



MASTER EN INGENIERIA INFORMATICA

PROYECTO FIN DE MASTER

Una Red de Sensores para las Smart Cities

A Wireless Sensor Networks for the Smart Cities

2014 - 2015

Calificación obtenida: 5 (Aprobado)

Directores: Prof. Dr. José Miguel Montaña

Prof. Dr. Alberto A. Del Barrio

Autorización de difusión

Autor

José Olavo Da Paz Teixeira

Fecha

Madrid, 7 de Septiembre de 2015.

El abajo firmante, matriculado en el Máster en Ingeniería en Informática de la Facultad de Informática, autoriza a la Universidad Complutense de Madrid (UCM) a difundir y utilizar con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a su autor el presente Trabajo Fin de Máster: “Una Red de Sensores para las Smart Cities”, realizado durante el curso académico 2014-2015 bajo la direcciones de José Miguel Montañana y Alberto A. Del Barrio en el Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática, y a la Biblioteca de la UCM a depositarlo en el Archivo Institucional E-Prints Complutense con el objeto de incrementar la difusión, uso e impacto del trabajo en Internet y garantizar su preservación y acceso a largo plazo.

RESUMEN

El objetivo del trabajo fin de Master consiste en el estudio de redes de sensores inalámbricos para las Smart Cities.

En particular, se implementa una red inalámbrica (tecnología ZIGBEE como protocolo de comunicación inalámbrica con micrófonos como sensores, para recolectar niveles de ruido.

Hemos elegido el Arduino como plataforma de cálculo para controlar cada nodo, y XBee como módulos de comunicación inalámbrico.

La red sensorial cuenta con tres nodos sensores que capturan el ruido y lo envían a un nodo receptor, que hace de estación central encargado de monitorizar los niveles de ruido. Dicho coordinador está conectado mediante USB a un PC, donde podemos comprobar las medidas recibidas por el XBee. Finalmente estos datos se muestran en una interfaz gráfica en el computador conectado al coordinador. De esta forma, puede monitorizarse el nivel de ruido de tres lugares diferentes en tiempo real.

PALABRAS CLAVE

Ciudad Inteligente, Red de Sensores Inalámbricos, Sensores, ZigBee, XBee, Arduino, Ruido

ABSTRACT

The objective of this Master Thesis consists of the study of a wireless sensor network especially suited for the Smart Cities.

Concretely, the implemented wireless network is based on the Zigbee technology and the use of microphones, to collect the noise level inside the city.

An Arduino board has been selected as the computing platform for each of the nodes composing the network, and the XBee modules to perform the wireless communication. The presented system is composed of three nodes which are responsible for collecting the noise level where they are placed, and afterwards sending it to a coordinator node. This coordinator receives the noise levels proceeding from the three nodes and forwards them to a central station, which is responsible for processing and showing the information. A graphical application has been developed for being executed in the central station. In this way, the noise levels of three different places can be monitored in real time.

KEYWORDS

Smart City, Wireless Sensor Network, Sensors, ZigBee, XBee, Arduino, Noise

Contenidos

ÍNDICE DE FIGURAS.....	III
ÍNDICE DE TABLAS.....	V
AGRADECIMIENTOS.....	VII
DEDICATORIA	IX
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. Motivación	2
1.2. Objetivos	3
1.3. Estructura de la Memoria.....	4
CHAPTER 1. INTRODUCTION	6
1.1. Motivation	6
1.2. Objectives.....	7
1.3. Memory structure.....	8
CAPÍTULO 2. SMART CITIES	10
2.1. Introducción	10
2.2. ¿Qué es una Smart City?	11
2.3. ¿Por qué Smart City?	11
2.4. Características de las Smart Cities	12
2.5. Trabajos hechos en las Smart Cities.....	14
2.6. El Futuro de las Smart Cities	17
2.6.1. La visión de la ciudad del futuro.....	17
CAPÍTULO 3. RED DE SENSORES INALÁMBRICOS (WSN).....	20
3.1. Introducción	20
3.2. Trabajos hechos en redes de sensores	20
3.2.1. El monitoreo del volcán activo	21
3.2.2. Cuidado De La Salud.....	22
3.2.3. Agricultura de precisión	22
3.3. El Sensor	23
3.4. Tipos de sensores	23
3.5. Sensores Acústicos	24
3.5.1. ¿Por qué es importante medir nivel de ruido?.....	24
3.6. Trabajo hecho con sensores acústicos para medir el nivel de ruido.....	25
3.7. Arquitectura de un nodo de Sensores.....	27
3.8. Tecnología ZigBee.....	28
3.8.1. Topología de la Red ZigBee	29
3.8.2. Módulos XBee	31

3.8.3.	Modos de operación de los módulos XBee	33
CAPÍTULO 4. MATERIALES, CONFIGURACIÓN Y ENTORNOS DE DESARROLLO		36
4.1.	Material utilizado.....	36
4.1.1	Elección del Arduino Uno.....	36
4.1.2	La plataforma Arduino	36
4.1.3.	Elección de los módulos XBee	43
4.1.4.	Elección de XBee Explorer USB.....	43
4.1.5.	Elección del Micrófono.....	44
4.1.6.	Elección de cargador USB portátil (Batería Power Bank)	45
4.2.	Herramientas de programación/configuración.....	46
4.2.1.	Elección de X-CTU para configurar los XBees.....	46
4.2.2.	Elección de IDE de Arduino	50
4.2.3.	Elección de Java para desarrollo de la interfaz gráfica	52
CAPÍTULO 5. ARQUITECTURA DEL SISTEMA.....		54
5.1.	¿Cómo está construido el sistema?	54
5.1.1.	Los nodos emisores.....	54
5.1.2.	El nodo coordinador.....	55
5.1.3.	El componente Gestión de Datos	56
5.1.4.	¿Cómo están interconectados los nodos del sistema?	56
5.2.	Programa desarrollado	56
5.2.1.	Funcionalidad del sistema	56
5.2.2.	Programa desarrollado para los nodos	57
5.2.3.	Programa desarrollada para interfaz gráfica	58
CAPÍTULO 6. EXPERIMENTOS REALIZADOS		60
6.1.	Comunicación emisor receptor entre los módulos XBee	60
6.1.1.	Experimentos de distancia entre los nodos en interior de la biblioteca	60
6.1.2.	Experimentos de distancia entre los nodos al aire libre	61
6.2.	Detección acústica en la biblioteca	63
6.3.	Detección acústica en una habitación con música	64
6.4.	Detección acústica en la carretera de la Plaza de España.....	66
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO		70
CHAPTER 7. CONCLUSIONS.....		72
8.	ABREVIATURAS	74
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	76
10.	ANEXO: PRESUPUESTO.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciudad Inteligente, Fuente: Libelium [17].	11
Figura 2. Las seis características que debe reunir una Smart City [19].	12
Figura 3. Trabajo hecho en Smart Parking, Fuente: Libelium [17].	14
Figura 4. Trabajo hecho en Noise Urban Maps, Fuente: Libelium [17].	15
Figura 5. Trabajo hecho en health y Waste Management, Fuente: Libelium [17].	16
Figura 6. Trabajo hecho en Smart Roads, Fuente: Sensors 2011 [31].	16
Figura 7. Visión del futuro de Smart City, Fuente: IDC Government Insights [20].	17
Figura 8. Los resultados de los datos recogidos de los 16 nodos sensoriales [30].	21
Figura 9. Trabajo hecho en detección acústica, Fuente: EAR-IT [24].	26
Figura 10. Arquitectura de Nodo de Sensores, Fuente: OECD, 2009 [15].	28
Figura 11. Topología Estrella [29].	29
Figura 12. Topología Árbol [29].	30
Figura 13. Topología Mesh [29].	30
Figura 14. Comunicación Punto a Punto y Punto a Multipunto [4].	31
Figura 15. Conexiones mínimas requeridas para el XBEE, Fuente: DIGI [3].	32
Figura 16. La placa Arduino Uno [4].	38
Figura 17. La Arduino Leonardo [1].	40
Figura 18. La Arduino Mega 2560 [1].	40
Figura 19. La Arduino Mega ADK [1].	41
Figura 20. La Arduino DUE [1].	41
Figura 21. La Arduino Nano [4].	42
Figura 22. Arduino LilyPad.	42
Figura 23. XBee 802.15.4 [3].	43
Figura 24. Arduino Wireless Proto Shield [1].	43
Figura 25. USB Explorer de SparkFun [5].	44
Figura 26. Micrófono KY-037.	44
Figura 27. Cómo conectar micrófono en el Arduino.	45
Figura 28. Cargador USB portátil - Batería Power Bank [35].	45
Figura 29. Ventana principal de X-CTU.	47
Figura 30. Confirmación de la consulta a X-CTU.	48
Figura 31. Configuración del módem en X-CTU.	49
Figura 32. Configuraciones escritas en XBee.	50
Figura 33. IDE Arduino-1.6.5 [1].	51
Figura 34. NetBeans IDE 8.0.2.	52
Figura 35. Arquitectura del Sistema.	54

Figura 36. Los nodos emisores y el nodo coordinador	56
Figura 37. Impresión de los datos de los tres nodos en Monitor Serial	58
Figura 38. Interfaz Gráfica de la aplicación	59
Figura 39. Archivo Nodo_1024.txt que almacena los datos monitorizados.....	59
Figura 40. Foto interior de la Biblioteca María Zambrano.....	60
Figura 41. Foto exterior de la Biblioteca María Zambrano.....	62
Figura 42. Mapa de localización de los nodos en la biblioteca	63
Figura 43. Detección acústica en la biblioteca	64
Figura 44. Mapa de localización de los nodos en una habitación.....	64
Figura 45. Detección acústica en una habitación con música	65
Figura 46. Mapa de localización de los nodos en la carretera.....	66
Figura 47. Foto en la carretera de la Plaza de España	67
Figura 48. Detección acústica en el túnel de la Plaza de España	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores para medir la calidad de una Smart City [14]	14
Tabla 2. Clasificación y ejemplos de sensores [6]	24
Tabla 3. Configuraciones de los nodos End Device y Coordinador	47
Tabla 4. Alcance de la red en función de la distancia entre nodos en la biblioteca	61
Tabla 5. Alcance de la red en función de la distancia entre Nodos al aire libre	62

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por permitirme llegar hasta esta etapa tan importante de mi vida, gracias por darme la salud, coraje y recursos.

En según lugar, quiero agradecer a mis directores, por sus apoyos y orientación prestada durante el desarrollo de este proyecto, porque sin ellos nunca habría sido posible. Siempre han estado ahí cuando les he necesitado y me han ayudado en todo lo que he necesitado. Muchas gracias por haberme aconsejado y por animarme en los momentos más difíciles. Gracias a ambos.

También me gustaría agradecer a mis compañeros de clase y profesores por haberme enseñado siempre cosas nuevas y haberme hecho crecer como persona. Gracias a todos.

No debo pasar por alto sin agradecer, el programa Erasmus Mundus por haberme concedido la beca durante todo el periodo de mis estudios. Especialmente a sus coordinadoras locales: Lola Prieto e Inmaculada Luis. Siempre han estado ahí cuando les he necesitado. De igual forma, me gustaría dar las gracias a Narciso Martí, Vicedecano de Posgrado por el apoyo en los momentos difíciles.

También quiero dar las gracias a mis padres, a mi hermano, a mis hermanas y a mi novia, por estar a mi lado durante todo el periodo del Máster, en momentos de alegría, de angustia, de nervios o de estrés. A mis padres, gracias por escucharme y respaldar las decisiones que he tomado hasta el momento y que me han llevado hasta aquí: mi carrera, mis estancias en el extranjero, mi vida laboral y este máster.

Agradezco a todos mis familiares y amigos, en especial a todos aquellos que siempre me han demostrado alegría, cariño y amistad.

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mis padres por haberme hecho la persona que soy y por haber estado siempre ahí conmigo, apoyándome y dándome ánimos.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En este primer capítulo se mostrarán las líneas generales del proyecto final de Máster realizado y que ha dado lugar a esta memoria. Se mostrará la motivación inicial del proyecto y los objetivos a cumplir.

1.1. Motivación

“Más del 50% de la población mundial vive en las ciudades hoy. Las ciudades representan un complejo ambiente dinámico, con muchos ciudadanos y empresas. El número de servicios que cada ciudad tiene para ofrecer o habilitar es enorme, yendo desde los servicios de utilidad pública y transporte a la seguridad de los ciudadanos y la infraestructura [16].”

Una ciudad inteligente proporciona un apoyo eficaz para la capacidad de recuperación de desastres, el medio ambiente amable, y un crecimiento económico sostenible [10].

El impulso de las Smart Cities está aumentando en los países desarrollados y los países en desarrollo. Las Smart Cities en el futuro serán una realidad en todas las ciudades del mundo.

Estas ciudades utilizarán el poder de las redes de comunicación, extendidas con redes de sensores inalámbricos (WSN) altamente distribuidas e inteligentes, que son muy accesibles en el mercado hoy en día, debido a su fácil instalación y mantenimiento. Las WSNs fueron usadas inicialmente en aplicaciones militares, pero ahora se han extendido a muchas áreas industriales y de interés social como: monitorización ambiental, monitorización de la salud, gestión de aparcamiento o control de tráfico, entre otros. Las WSNs han evolucionado, se ha hecho posible predecir el futuro, usando un entorno inteligente que no existía en el pasado [36].

Las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN) permiten interacciones inteligentes entre los usuarios y máquinas, y proporcionan un tremendo beneficio social [6]. Pueden ayudar a

evitar fallos de infraestructura, conservar valiosos recursos naturales, aumentar la productividad, mejorar la seguridad, y permitir nuevas aplicaciones para la recolección de datos en las Smart Cities.

1.2. Objetivos

El objetivo del Trabajo de Fin de Máster consiste en el estudio de Smart Cities implementando redes de sensores inalámbricos para recolectar datos de ruido mediante micrófonos. Para ello, se usarán ARDUINO como plataforma de cálculo para controlar cada nodo y ZIGBEE como protocolo de comunicación inalámbrica, través de módulos XBee.

Como pruebas/experimentos vamos a realizar:

- La prueba sobre la distancia hasta la que hay comunicación entre emisor y receptor usando los módulos XBee.
- Lectura de las medidas de los datos capturados por los micrófonos.

Entre las funcionalidades a incorporar en la aplicación destacamos:

- Cada nodo tendrá un identificador único en la red.
- Cada nodo almacena localmente las medidas más recientes.
- El nodo coordinador se conecta con un PC que mostrará gráficamente la evolución de las medidas de todos los sensores de todos los nodos.

1.3. Estructura de la Memoria

El resto de esta memoria está constituido en los siguientes capítulos:

El capítulo 2 explicará el concepto de Smart City, que es la motivación principal de este trabajo. Para ello se explicará cómo se caracterizan las ciudades inteligentes, explicando los principales trabajos hechos en Smart Cities y se terminará describiendo el futuro de las Smart Cities.

El capítulo 3 se centrará en el estado del arte de las Redes de Sensores Inalámbricos. Aquí se detallará que son, se explicarán los trabajos hechos en las Redes de Sensores Inalámbricos, las distintas arquitecturas, y se terminará describiendo las tecnologías ZigBee.

El capítulo 4 se centrará en los materiales utilizados durante el desarrollo del sistema. Aquí se explicará la elección de cada dispositivo utilizado, las herramientas de configuración y de programación.

El capítulo 5 explicará la arquitectura del sistema que se va a utilizar en este proyecto. Para ello se detallará cómo están estructurados los nodos, y se dará una breve explicación del funcionamiento de cada nodo. También se incluye una breve explicación del desarrollo de la aplicación.

El capítulo 6 va a mostrar los experimentos que hemos hecho durante el desarrollo del proyecto. Inicialmente se comprobará hasta qué distancia hay comunicación entre emisor/receptor con los módulos XBee, y en segundo lugar se evaluará el ruido en diversos escenarios.

El capítulo 7 dará las conclusiones finales y discutirá posibles líneas de trabajo futuro.

CHAPTER 1. INTRODUCTION

In this first chapter the general ideas of this Master Thesis will be shown. The motivation and the objectives of this project will be shown.

1.1. Motivation

“More than 50% of the world population lives in the cities today. Cities represent a complex dynamic environment, with many citizens and companies. The number of services that each city can offer is huge, e.g. transport, security, infrastructures, etc. [16]”

A Smart City provides an efficient support to the capacity for disasters recovering, a friendly environment and a sustainable economic growth [10].

The impulse to the Smart Cities is increasing in the developed and developing countries. In fact, the Smart Cities will become a reality in all the cities of the world.

These cities utilize the communication networks as well as the Wireless Sensor Networks (WSN), which are highly distributed and possess intelligent elements. Moreover, the WSNs are not very expensive, and they can be easily installed and maintained. Initially, however, the WSNs were used for military purposes, but nowadays they have been applied to other industrial and social areas, for instance: environmental monitoring, health monitoring, parking management or traffic control among others. The WSNs have evolved during the recent years, being possible to “predict the future” by means of using a smart environment, which was not available in the past [36].

The WSNs allow the users and the machines to intelligently interact, and they provide a tremendous social benefit [6]. They can help avoid infrastructure failures, preserve valuable natural resources, increase the productivity, improve the security and allow the development of new applications able to collect data from the Smart Cities.

1.2. Objectives

The objective of this Master Thesis is to implement a wireless sensor network for collecting noise levels in a Smart City. For this purpose, several microphone sensors, Arduino boards and Xbee modules have been utilized.

The following experiments will be performed to evaluate our platform:

- A study about the supported distance among the sensor nodes and the coordinator node.
- Real time monitoring of the noise levels captured in three different places.

Among the functionalities that will be included in the application, the following ones are highlighted:

- Each node will possess a unique identifier within the network.
- Each node locally stores the most recent noise levels.
- The coordinator node is connected to a PC which will graphically show the evolution of these measurements for all the sensor nodes.

1.3. Memory structure

The rest of the memory is organized in the following way:

Chapter 2 will explain the Smart City concept, which is the main motivation of this work. For this reason, a description about how the Smart Cities are characterized will be provided, discussing the main works developed for the Smart Cities. Finally, the future of the Smart Cities will be outlined.

Chapter 3 will be focused on the WSNs state of the art. WSNs will be described in detail, and several works related to the Smart Cities will be depicted. Different WSN topologies will be explained as well. Finally, the Zigbee technology will be introduced.

Chapter 4 will be focused in the framework utilized for developing the platform presented in this Master Thesis. The choice of every device, as well as the configuring and programming tools, will be described in detail.

Chapter 5 deals with the implementation of our system. The deployment of the nodes, its structure and the functionalities of every type of node will be explained in depth. The graphical application responsible for showing the data will be described too.

Chapter 6 will show the experiments that have been performed to check the correct working of the proposed system. Initially the distances among the sender nodes and the receiver one will be studied, and secondly the noise will be evaluated for different scenarios

Chapter 7 will give our final remarks and discuss the future lines of work.

CAPÍTULO 2. SMART CITIES

En este capítulo se explicará el concepto del Smart Cities, cómo se caracterizan las ciudades inteligentes, y se describirán los principales trabajos hechos en Smart Cities y el futuro de las Smart Cities.

2.1. Introducción

“Las Smart Cities a menudo son lugares atractivos para vivir, trabajar y visitar” [18]. Una ciudad inteligente proporciona un apoyo eficaz para la capacidad de recuperación de desastres y una interacción amable con el medio ambiente, así como un crecimiento económico sostenible [10].

“Durante gran parte del siglo XX, la idea de que una ciudad pudiera ser inteligente era una ficción que fue representada en los medios de comunicación populares, pero de repente con la proliferación masiva de pequeños dispositivos de cálculo, con un mínimo de inteligencia y capacidad para ser embebidos, la perspectiva de que una ciudad podría llegar a ser inteligente, sensible, incluso, se está convirtiendo en la nueva realidad” [19].

Las aplicaciones para Smart Cities (véase la Figura 1) utilizan Redes de Sensores Inalámbricos (Wireless Sensor Networks, WSN) inteligentes para mejorar las infraestructuras y servicios urbanos, mejorando así la calidad de vida de los ciudadanos, facilitando el acceso a la información y tomando decisiones eficazmente [13]. Estas funcionalidades se explicarán en detalle en este capítulo y en el próximo, en el que se habla sobre WSNs.

Libelium Smart World

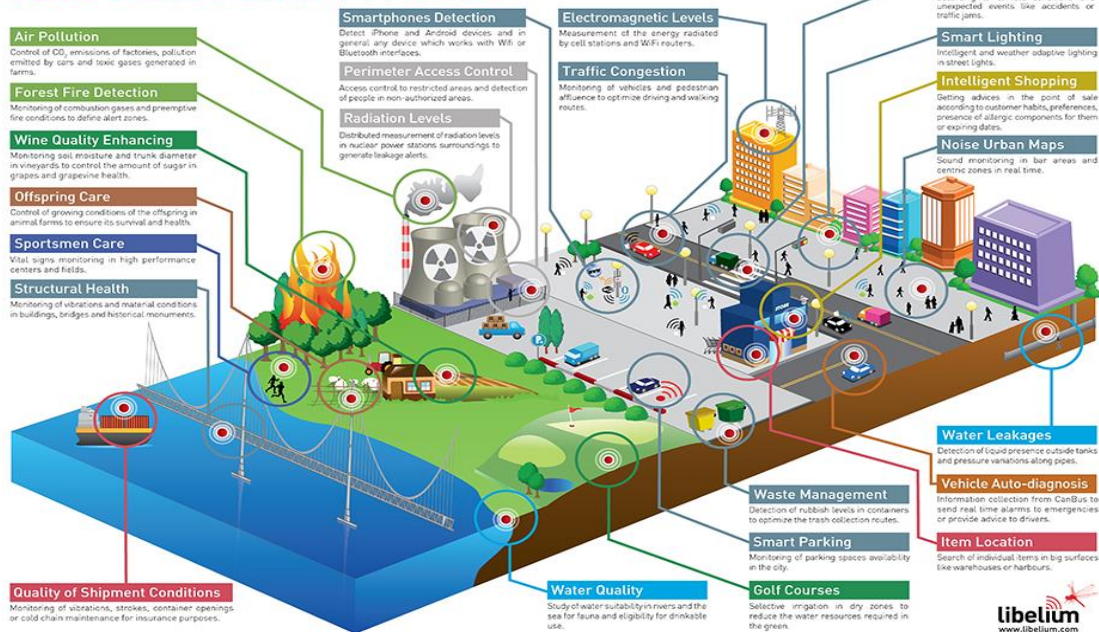


Figura 1. Ciudad Inteligente, Fuente: Libelium [17].

2.2. ¿Qué es una Smart City?

“Smart City es aquella ciudad que usa las tecnologías de la información y las comunicaciones para hacer que tanto su infraestructura crítica, como sus componentes y servicios públicos ofrecidos sean más interactivos, eficientes y los ciudadanos puedan ser más conscientes de ellos”[13].

2.3. ¿Por qué Smart City?

Vivimos en un mundo que está sufriendo crisis económicas, el cambio climático, el envejecimiento de la población y una rápida urbanización. Pero también vivimos en medio de tremendas innovaciones tecnológicas que tienen el potencial para abordar las cuestiones que desafían a todas las ciudades del mundo [20].

2.4. Características de las Smart Cities

El concepto de Smart City, de acuerdo con la página de las European Smart Cities [12], debe agrupar las siguientes seis características (véase la Figura 2):

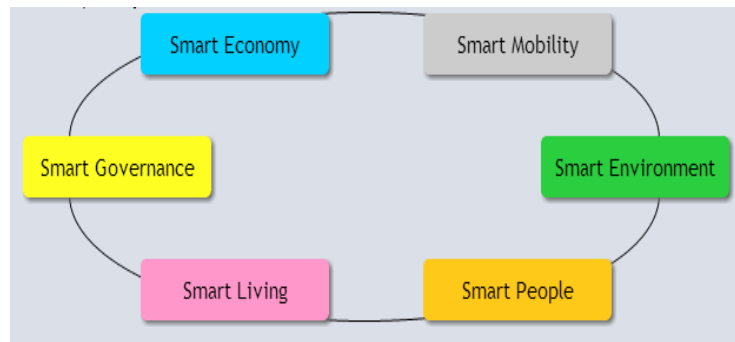


Figura 2. Las seis características que debe reunir una Smart City [19].

Las seis características citadas se evalúan mediante una serie de factores, a los que se asocian a su vez indicadores que facilitan el análisis de la evolución de una ciudad hacia el concepto de Smart City [14]. La Tabla 1 siguiente recoge dichos factores:

<i>Características</i>	<i>Descripción</i>
Smart Economy (Competitividad)	<ul style="list-style-type: none"> • Espíritu Innovador • Emprendedores • Imagen Económica y marca • Productividad
Smart People (Capital Social y Humano)	<ul style="list-style-type: none"> • Nivel de cualificación • Afinidad para aprendizaje continuo • Creatividad • Participación en la vida pública
Smart Governance (Participación)	<ul style="list-style-type: none"> • Participación en la tomada de decisiones • Servicios público y social • Gobierno transparentes Perspectivas y estrategias Políticas
Smart Mobility (Transporte y TIC)	<ul style="list-style-type: none"> • Accesibilidad Local • Accesibilidad internacional • Disponibilidad de infraestructura TIC • Sistema de transporte sostenibles, • Innovadores y seguros
Smart Environment (Recursos naturales)	<ul style="list-style-type: none"> • Condiciones natural favorables • Polución • Protección ambiental • Gestión sostenible de recursos

Smart Living (Calidad de vida)	<ul style="list-style-type: none"> • Facilidades culturales • Condiciones de salud • Seguridad del individuo • Calidad de la vivienda • Facilidad en la educación • Turismo atractivo <p>Cohesión social</p>
---------------------------------------	--

Tabla 1. Factores para medir la calidad de una Smart City [14]

2.5. Trabajos hechos en las Smart Cities

La empresa Libelium [17], tiene experiencia en la creación e implementación de redes sensoriales inalámbricas para Smart Cities. Las principales aplicaciones que dicha empresa desarrolló dentro de las Smart Cities se describen a continuación:

- **Smart Parking.** Permite monitorizar de plazas de aparcamiento para informar de su disponibilidad, (ver Figura 3).

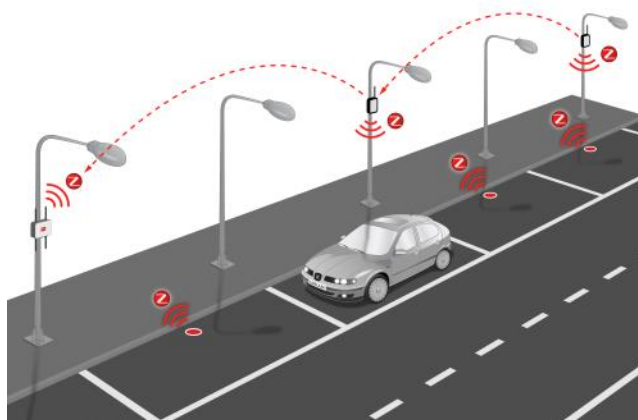


Figura 3. Trabajo hecho en Smart Parking, Fuente: Libelium [17].

- **Structural health.** Permite monitorizar del estado de los materiales en construcciones de los edificios, puentes y monumentos históricos, (ver Figura 5).
- **Noise Urban Maps.** Permite monitorización de ruidos en zonas céntricas o de bares en tiempo real (ver Figura 4). El proyecto Noise Urban Maps es un proyecto que podemos considerar similar a nuestro, tengo en cuenta que recoge nivel de ruido y monitoriza en tiempo real. La diferencia es que nuestro sistema está pensado para ser implementada en cualquier zona.



Figura 4. Trabajo hecho en Noise Urban Maps, Fuente: Libelium [17].

- **Smartphone Detection.** Permite detectar cualquier dispositivo que funciona con WiFi o interfaces de Bluetooth para establecer la comunicación.
- **Electromagnetic Field Levels.** Permite medir los niveles de radiación energética de las estaciones móviles y routers y WiFi.
- **Traffic Congestion.** Permite la monitorización de vehículos y peatones para facilitar la conducción y la definición de rutas.
- **Waste Management.** Permite controlar niveles de basura en contenedores para optimizar las rutas de recolección de basura (ver Figura 5).



Figura 5. Trabajo hecho en health y Waste Management, Fuente: Libellium [17].

Smart Roads.

Como ejemplo de otros trabajos realizados por empresas diferentes a Libellium, nos fijaremos en el proyecto IntelliDrive del Departamento de Transporte de Estados Unidos [31], el Sistema Inteligente de Transporte (ITS). Este sistema proporciona servicios de tráfico en tiempo real a los conductores, para lo cual utiliza diversos sensores para asistencia al conductor y advertencias de seguridad de tráfico.

Como se muestra en la Figura 6, cuando un vehículo se aproxima a una intersección podemos decidir si se trata de una posición peligrosa. Los datos viajan en tiempo real que se aplica en este servicio intersección a través de sensores basados en la infraestructura y los sensores del vehículo. Un servidor de carretera inteligente, entonces procesa un algoritmo de violación de advertencia de color rojo claro, y el conductor se proporciona la información relevante a través de un dispositivo de navegación inteligente.

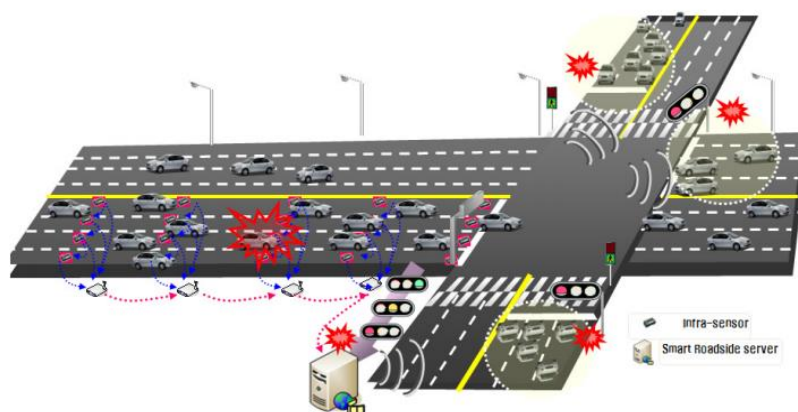


Figura 6. Trabajo hecho en Smart Roads, Fuente: Sensors 2011 [31]

2.6. El Futuro de las Smart Cities

Las ciudades inteligentes son el futuro para los municipios de todo el mundo. Estas ciudades utilizan el poder de la tecnología de las redes sensores inalámbricas, altamente distribuidos, y de sistemas inteligentes de gestión para resolver los retos que suponen los nuevos servicios [20].

2.6.1. La visión de la ciudad del futuro

La Figura 7 ejemplifica una ciudad con una capa dominante de la Tecnología de la Información y de la Comunicación (TIC), que conecta las cosas, las organizaciones y las personas por medio del Internet of Things (IoT). Por ejemplo, los sensores de los coches envían los datos a sistemas de gestión inteligente, como los de las autopistas, que a su vez los reenvían a los centros de gestión de transporte. Estos centros analizan estos datos en tiempo real, proporcionando escenarios hipotéticos en caso de eventos o accidentes [20].

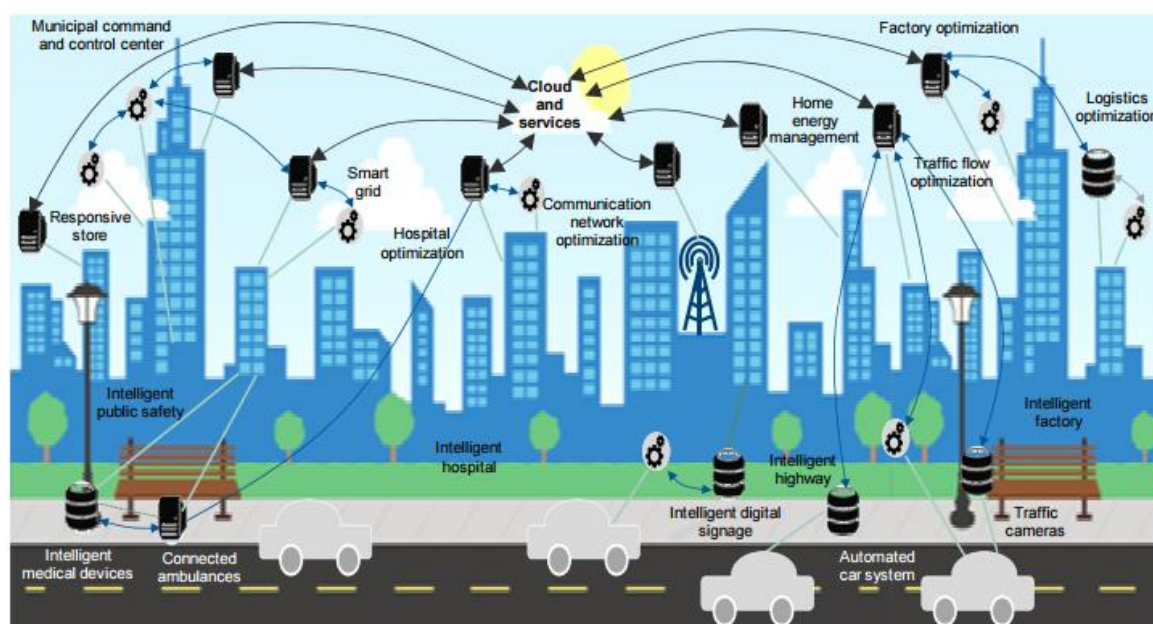


Figura 7. Visión del futuro de Smart City, Fuente: IDC Government Insights [20]

Actualmente muchas cosas están conectadas a Internet o a sistemas inteligentes. IDC [20] proyecta que para el 2020, habrá 212 mil millones de "cosas" conectadas en el mundo y que para el año 2017, 3.5 mil millones de personas se conectarán a Internet, el 64% de ellas a través de dispositivos móviles. Tantos elementos conectados generarán cantidades masivas de datos, se estima que 40 billones de gigabytes, que tendrán un impacto significativo en la vida diaria. En resumen, la IoT permitirá una respuesta más rápida a las emergencias de seguridad médica o pública, y mejorará la calidad de vida de los ciudadanos por la prestación de servicios directos y personales.

CAPÍTULO 3. RED DE SENSORES INALÁMBRICOS (WSN)

Este capítulo se centrará en el estado del arte de las Redes de Sensores Inalámbricos. Aquí se detallará que son, se explicarán los trabajos hechos en las Redes de Sensores Inalámbricos, las distintas arquitecturas, y se terminará describiendo las tecnologías ZigBee.

3.1. Introducción

Las Redes de Sensores Inalámbricos (Wireless Sensor Networks, WSNs) son una importante tecnología para la vigilancia a gran escala, proporcionando mediciones de los sensores a alta resolución temporal y espacial [21].

El desarrollo de WSNs fue inspirado por aplicaciones militares, especialmente en la vigilancia de las zonas de conflicto. La investigación sobre WSNs se intensificó a principios de los años 1980, cuando la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa de los Estados Unidos (DARPA), llevó a cabo el programa de redes de sensores distribuidos para los militares de Estados Unidos [28]. El primer sistema que tiene todas las características de las redes de sensores es el sistema de sonido de Vigilancia (SOSUS), que se hizo para detectar y rastrear submarinos [22].

- **¿Qué es una red de sensores inalámbricos?**

Las redes de sensores inalámbricos (WSN) se componen de pequeños nodos de sensores equipados con interfaces de radio y están distribuidas sobre una región geográfica. La tarea de cada sensor es realizar mediciones y a enviar datos a un nodo coordinador [9].

3.2. Trabajos hechos en redes de sensores

En el capítulo 2 explicamos los trabajos hechos en las Smart Cities; no sería posible realizar estos trabajos sin las tecnologías de redes de sensores inalámbricos. En este capítulo se describirán las aplicaciones basadas en redes de sensores inalámbricos.

Se han realizado varios trabajos en diferentes áreas o sectores como: monitorización de volcanes activos [30], vigilancia del medio ambiente, vigilancia de la salud estructural, agricultura de precisión, atención de la salud, el transporte, o la supervisión de la actividad humana entre otros [6]. A continuación, describiremos algunas de estas aplicaciones en detalle.

3.2.1. El monitoreo del volcán activo

Las redes de sensores inalámbricos pueden ayudar en gran medida a la comunidad geofísica. Los científicos de la Universidad de Harvard en colaboración con la Universidad de North Carolina, la Universidad de New Hampshire, y el Instituto Geofísico de Ecuador [30], fueron los primeros que innovaron con el estudio sobre los volcanes activos. Para ello implementaron redes de sensores inalámbricos para recoger la actividad sísmica y las señales acústicas de baja frecuencia. Desplegaron una pequeña red de sensores inalámbricos en el Volcán Tungurahua del centro Ecuador como una prueba durante tres días. La arquitectura de la red estaba formada por 16 nodos, equipados con micrófonos para recoger los datos en tiempo real del volcán en erupción. La arquitectura de la red del sensor de monitorización del volcán activo Consta de 16 nodos de sensores, cada uno con un micrófono y sismómetro, para recoger de datos sísmicos y acústicos sobre actividad volcánica. En la continuación en la Figura 8 se ven los resultados de los datos recogidos de los 16 nodos de los sensores.

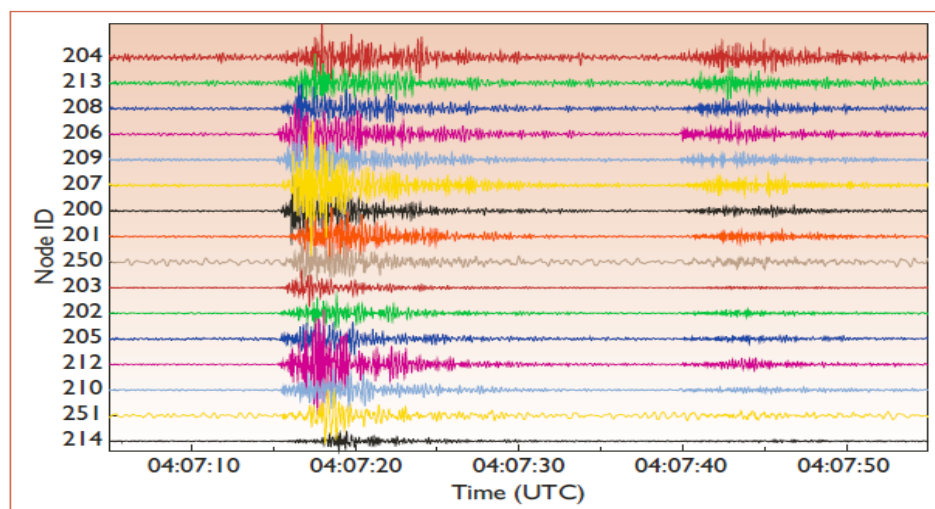


Figura 8. Los resultados de los datos recogidos de los 16 nodos sensoriales [30]

3.2.2. Cuidado De La Salud

En los últimos años se ha propuesto una amplia gama de aplicaciones de cuidado de la salud basadas en redes de sensores inalámbricos. Por ejemplo, las WSN se han utilizado para monitorizar pacientes con epilepsia, problemas cardíacos, la rehabilitación del accidente cerebrovascular o ataque al corazón, y las personas de edad avanzada. A continuación se resumen los sensores inalámbricos disponibles en el mercado para la vigilancia de la salud [6]:

- Sensores de saturación de oxígeno: miden el porcentaje de hemoglobina, saturado con el oxígeno y la frecuencia cardíaca.
- Sensores de presión arterial.
- Electromyogram (EMG): para medir las actividades musculares.
- Sensores de temperatura - tanto para la temperatura corporal y la temperatura de la piel.
- Sensores de respiración.
- sensores de flujo de sangre.
- Sensor de nivel de oxígeno en la sangre: para medir el esfuerzo cardiovascular (angustia).

3.2.3. Agricultura de precisión

La agricultura de precisión es un método de gestión agrícola que permite a los agricultores a producir de manera más eficiente. La agricultura de precisión se basa en los Sistemas de Información Geográfica: GPS, radar, imágenes aéreas, etc. Un gran número de tecnologías se han desarrollado en los últimos años para facilitar y automatizar la agricultura de precisión [6]. Algunos de estos son:

- **Monitores de Rendimiento:** se trata de dispositivos que utilizan, entre otras cosas, los sensores de flujo de masa, los sensores de la humedad, y un receptor GPS para supervisar el rendimiento instantáneo basado en el tiempo y la distancia.
- **Mapeo de Salinidad:** Esto se utiliza para asignar campos que se ven afectados por la salinidad. mapeo salinidad que es valioso en la interpretación de mapas

de rendimiento y mapas de malezas, así como el seguimiento del cambio en salinidad en el tiempo.

3.3. El Sensor

Un objeto que realiza una tarea de detección se llama un sensor. Por ejemplo, el cuerpo humano está equipado con sensores que son capaces de capturar información óptica del medio ambiente (ojos), información acústica tales como sonidos (orejas) y olores (nariz). Estas son ejemplos de sensores remotos, es decir, que no tienen que tocar el objeto supervisado para recolectar información.

¿Qué es un sensor?

“Un sensor es un dispositivo que traduce parámetros o eventos del mundo físico en señales que pueden ser medidos y analizados” [6].

Según estos autores [6], sensor es un tipo de transductor que convierte la energía del mundo físico en energía eléctrica que se puede pasar a un sistema de computación o controlador.

3.4. Tipos de sensores

La elección de un sensor para una aplicación depende de la propiedad física que debe ser controlada, por ejemplo, la temperatura, la presión, la luz o la humedad. La Tabla 2 resume algunas propiedades físicas comunes, incluyendo ejemplos de detección tecnologías que se utilizan para capturarlos. Con estos sensores podemos construir *numerosos dispositivos y máquinas*, proporcionando un tremendo beneficio social.

Tipo	Ejemplos de Sensores
Temperatura	Termistores, termopares
Presión	Manómetros, barómetros, medidores de ionización
Acústico	Micrófonos, Resonadores piezoeléctricos
Humedad	Los sensores capacitivos y resistivos, higrómetros, Sistemas micro electromecánicos(MEMS) basado sensores de humedad

Movimiento, vibración	Acelerómetros, giroscopios, sensores de fotos
Posición	GPS, sensores basados en ultrasonidos, sensores basados infrarrojos

Tabla 2. Clasificación y ejemplos de sensores [6]

3.5. Sensores Acústicos

En realidad, un sensor de acústico [34], no es más que un sensor de presión que convierte las ondas de presión de aire (las ondas sonoras) en señales eléctricas de tipo analógica; es decir, un micrófono. Existen muchos tipos de micrófonos según el mecanismo físico que utilizan para realizar esa conversión: los de tipo “inductivo” (también llamado “dinámicos”), los “de condensador”, los piezoeléctricos, etc. Dependiendo del tipo, unos tendrán una mejor respuesta a un rango determinado de frecuencias de sonido que otros.

3.5.1. ¿Por qué es importante medir nivel de ruido?

Según la “European Commission - Environment” [23], la contaminación acústica ambiental se refiere al ruido causado por carretera, ferrocarril y tráfico del aeropuerto, la industria, la construcción, así como algunas otras actividades al aire libre.

“El ruido excesivo perjudica seriamente la salud humana e interfiere con las actividades diarias de las personas en la escuela, en el trabajo, en casa y en el tiempo libre. Se puede perturbar el sueño, causar efectos cardiovasculares y psicofisiológicos, reducir el rendimiento y provocar respuestas molestia y los cambios en el comportamiento social” [27].

En base a varios estudios experimentales, la relación entre la exposición del ruido nocturno y efectos la salud se pueden resumir de la siguiente manera [32]:

- **Hasta 30 dB.** Aunque las sensibilidades y las circunstancias individuales pueden diferir, parece que hasta este nivel no se observan efectos biológicos importantes.

- **De 30 dB a 40 dB.** Una serie de efectos sobre el sueño se observan desde este rango: movimientos corporales, despertar, molestias, etc. La intensidad del efecto depende de la naturaleza de la fuente y el número de eventos. Los grupos más vulnerables son los niños, los enfermos crónicos, etc.
- **De 40 dB a 55 dB.** Se observan efectos de salud perjudiciales entre la población expuesta. Muchas personas tienen que adaptar sus vidas para hacer frente al ruido por la noche. Los grupos vulnerables están más severamente afectados.
- **Por encima de 55 dB.** La situación se considera cada vez más peligrosa para la salud pública. Suceden efectos adversos para la salud con frecuencia, como la perturbación del sueño. Además, hay pruebas de que el riesgo de enfermedades cardiovasculares aumenta.

En resumen, medir el nivel de ruido es importante, puede contribuir a convertir las ciudades y edificios en entornos inteligentes, ayudando a ahorrar energía y protegiendo a las personas, mejorando así el bienestar de los usuarios finales [26].

3.6. Trabajo hecho con sensores acústicos para medir el nivel de ruido

Como ejemplo del trabajo hecho en detección acústica para ciudades inteligentes tomamos el proyecto EAR-IT (Experimenting Acoustics in Real environments using Innovative Test-beds). Es un proyecto co-financiado por la UE sobre los retos que aparecen en la detección acústica en las ciudades y edificios inteligentes.

El proyecto EAR-IT se basa en 2 bancos de pruebas para demostrar el uso de datos acústicos en entornos inteligentes: los bancos de pruebas para la ciudad inteligente SmartSantander y los banco de pruebas para el edificio inteligente HobNet [25].

- **SmartSantander** es una ciudad inteligente, líder europea implicada en varios proyectos de investigación. EAR-IT planea desplegar varios sensores de acústica capaz, por ejemplo, para reconocer y localizar eventos como las sirenas de vehículos de emergencia, alerta para los ciudadanos en caso de accidente de coche, personas gritando etc. [26].
- **HobNet**, que ha sido desarrollado para una investigación sobre redes de sensores inalámbricos para edificios inteligentes. El banco de pruebas actual está

dirigido por Mandat Internacional en Ginebra en un entorno de oficina inteligente. EAR-IT pretende desplegar su sistema de vigilancia de audio para reconocer la presencia de usuarios y que puedan experimentar las interacciones más ricas con su entorno de trabajo, además de mejorar la eficiencia energética [26].

La Figura 9 ilustra la ciudad y el edificio inteligente con la solución acústica inteligente del proyecto EAR-IT, la cual proporciona un conocimiento de la situación en tiempo real.

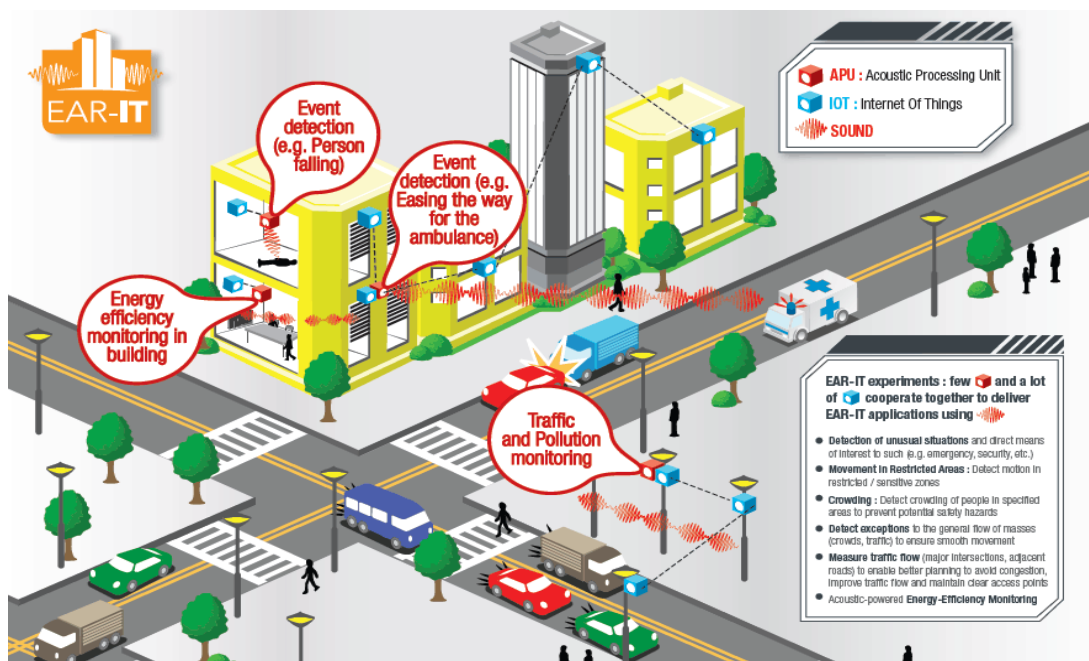


Figura 9. Trabajo hecho en detección acústica, Fuente: EAR-IT [24]

- **¿Por qué las redes de sensores inalámbricos?**

Las características fundamentales de las redes de sensores son la fiabilidad, precisión, flexibilidad, bajo coste y facilidad en la implementación. A continuación se detallan algunas de estas facetas [7]:

- **Exactitud de detección:** la utilización de un mayor número y diversidad de nodos de sensores permite mayor rigor en la información recogida en comparación con la obtenida a partir de un único sensor.

- **Área de cobertura:** una red eficiente puede abarcar un área geográfica extensa sin impacto negativo en el coste total de la red.
- **Tolerancia a fallos:** la información redundante puede ser utilizada para garantizar un nivel de tolerancia a fallos en los sensores individuales.
- **Conectividad:** el agrupamiento de las redes permite que cada red individual se centre en áreas o eventos específicos, y comparta con otras redes sólo la información pertinente.

3.7. Arquitectura de un nodo de Sensores

Un nodo sensor normalmente consta de cinco partes principales como muestra la Figura 10 a continuación:

- Uno o más **sensores** recogen datos del medio ambiente.
- **La unidad central**, en la forma de un microprocesador que gestiona las tareas.
- **Un transceptor** (incluido en el módulo de comunicación) se comunica con el medio ambiente.
- **Una Memoria**, que se utiliza para almacenar datos temporales o datos generados durante el procesamiento.
- **La Batería**, que proporciona la energía suficiente al resto de elementos. Para aumentar la vida de la batería la eficiencia energética en todas las partes de la red es crucial. Debido a esta necesidad, las tareas de procesamiento de datos a menudo se propagan por la red, es decir, los nodos cooperan en la transmisión de datos a los nodos sumideros [15].

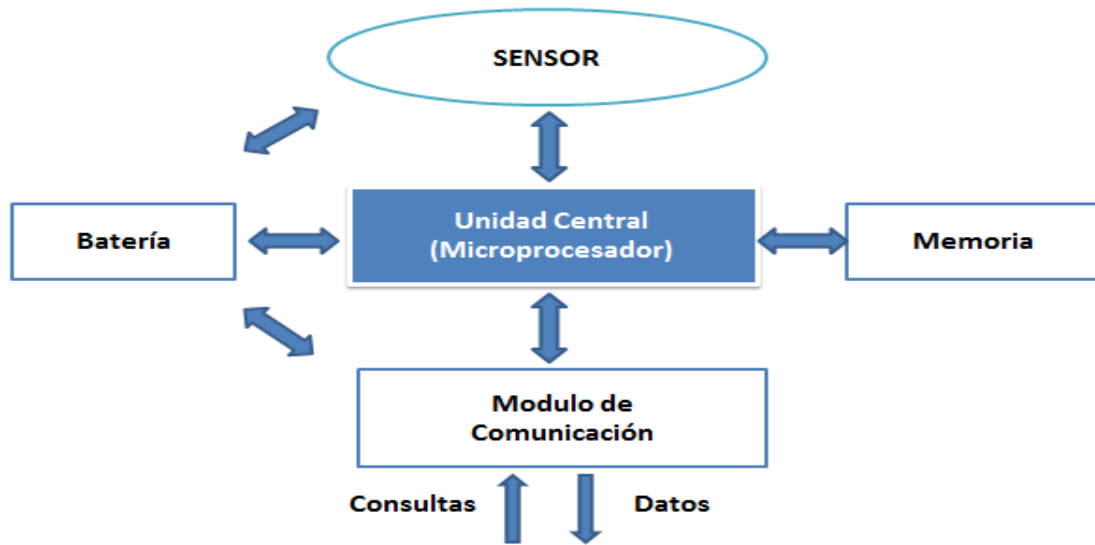


Figura 10. Arquitectura de Nodo de Sensores, Fuente: OECD, 2009 [15]

3.8. Tecnología ZigBee

La comunicación inalámbrica permite que dos o más dispositivos se comuniquen sin cables que los unan. Los transmisores inalámbricos funcionan transmitiendo datos en forma de ondas de radio través del espacio mediante un proceso de radiación electromagnética en una frecuencia dada [4].

ZigBee es un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radiodifusión digital de bajo consumo, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal [2].

La ZigBee Alliance es una asociación global de empresas que trabajan conjuntamente creando soluciones inalámbricas estandarizadas para utilizarlas en aplicaciones de gestión de la energía, aplicaciones comerciales y de consumo. [2].

3.8.1. Topología de la Red ZigBee

El rendimiento de la red ZigBee depende de la topología. Básicamente es compatible con tres topologías: estrella, árbol y mesh. La topología depende de la situación de los dispositivos: coordinador, router y los dispositivos finales [29].

- **Topología en estrella.** En la topología en estrella el coordinador está rodeado de dispositivos como se muestra en la Figura 11. Se puede configurar fácilmente. Puede soportar hasta 6000 dispositivos. Pero también hay algunas limitaciones: si coordinador no puede trabajar debido a algún problema técnico, entonces toda la red falla, ya que todo el tráfico pasa por el coordinador de la estrella. En conclusión, esta topología no ofrece una transmisión fiable.

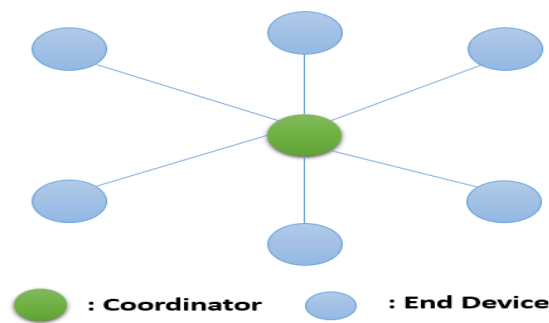


Figura 11. Topología Estrella [29]

- **Topología en árbol.** En la topología de árbol el coordinador se encuentra en la raíz de la red como se muestra en la Figura 12. Solamente los routers y coordinador pueden actuar como nodos padre. Varios dispositivos finales se pueden conectar a los routers como nodos hijo. Cuando un nodo quiere transmitir mensaje a otro nodo, entonces envía mensaje a su nodo padre. Si cualquier router no funciona, entonces sus hijos (dispositivos finales) también dejar de trabajar.

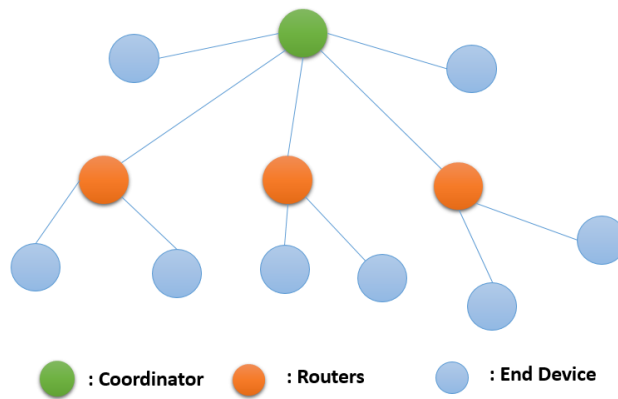


Figura 12. Topología Árbol [29]

- **Topología mesh.** Esta es la topología más flexible y fiable porque hay varios caminos posibles para que un mensaje llegue al destino. Si un router no trabaja, entonces el mensaje puede ser transmitido a través de otro camino como se muestra en la Figura 13. Hay una serie de rutas alternativas.

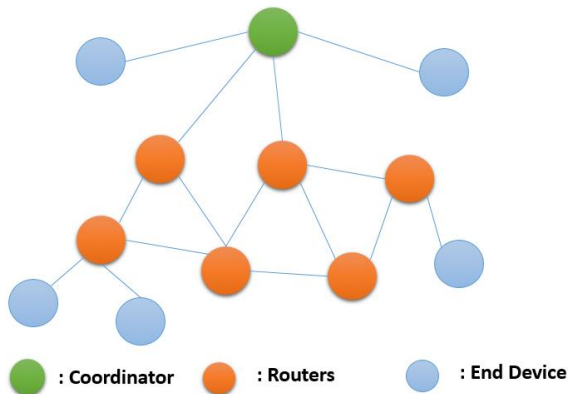


Figura 13. Topología Mesh [29]

- Existen tres tipos de nodos que forman una red ZigBee se describen a continuación [8]:

- **El coordinador**

Las redes ZigBee siempre tienen un solo dispositivo coordinador. Este nodo es responsable de la formación de la red, la entrega de direcciones, y la gestión de las otras funciones que definen la red.

- **Los routers**

Un router puede unirse a las redes existentes, enviando y recibiendo información, y encaminar la información en la ruta. Routing significa actuar como un mensajero facilitando las comunicaciones entre otros dispositivos que están demasiado lejos. Una red puede tener múltiples nodos de tipo router.

- **Dispositivos finales**

Los dispositivos finales (end devices) son dispositivos con funcionalidades más reducidas que las de un router. Pueden unirse a las redes y enviar y recibir información, pero no actúan como mensajeros entre cualquier otro dispositivo. Además son menos costosos y pueden apagarse intermitentemente, contribuyendo al ahorro de energía. Los dispositivos finales siempre necesitan un router o un coordinador que actúe de máster en la comunicación.

3.8.2. Módulos XBee

XBee es propiedad de Digi, y está basado en el protocolo ZigBee. En pocas palabras, los XBees son módulos inalámbricos fáciles de usar. Según Digi [11], los módulos XBee son soluciones integradas que brindan un medio inalámbrico para la interconexión y comunicación entre dispositivos. Los módulos XBee utilizan el estándar IEEE 802.15.4.

La radio XBEE transmite datos a 2,4 GHz, para crear redes punto a punto, o para redes punto a multipunto [4]. La Figura 14 muestra ejemplos de ambas. Fueron diseñados para aplicaciones que requieren de un alto tráfico de datos, baja latencia y una sincronización de comunicación predecible.



Figura 14. Comunicación Punto a Punto y Punto a Multipunto [4]

La Figura 15 muestra las conexiones mínimas que necesita el módulo XBee para poder ser utilizado. Luego de esto, se debe configurar según el modo de operación que se desea para la aplicación requerida por el usuario.

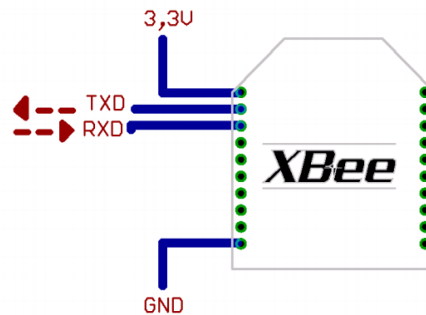


Figura 15. Conexiones mínimas requeridas para el XBEE, Fuente: DIGI [3]

El módulo requiere una alimentación desde 2.8 a 3.4 V, la conexión a tierra y las líneas de transmisión de datos por medio del UART (TXD y RXD) para comunicarse con un microcontrolador, o directamente a un puerto serial utilizando algún conversor adecuado para los niveles de voltaje.

Comparativas principales entre los módulos XBee

Hay diferencias en cada serie de XBee. Hay versiones profesionales y no profesionales de la mayoría de los módulos. Las versiones profesionales son totalmente compatibles con sus equivalentes no profesionales, pero consumen más, cuestan más, son un poco más largos y tienen bastante más alcance.

- **El módulo XBee**, presenta una potencia de salida de 1mW, y la sensibilidad del receptor es de -92dBm. Esto le permite operar hasta a unos 100m en espacios abiertos, y hasta 30m en espacios urbanos. tienen veinte pines y son, en su mayoría, compatibles entre sí. Tienen capacidad de comunicación punto a punto y multipunto, pero no implementan el estándar ZigBee.
- **El módulo XBee PRO** presenta una potencia de salida de 60mW (18dBm), y la sensibilidad del receptor es de -100dBm. Esto le permite operar a más de 1km en espacios abiertos, y hasta 300m en espacios urbanos.

3.8.3. Modos de operación de los módulos XBee

Los radios XBee pueden comunicar en 5 modos diferentes que son Modo RECIBIR/TRANSMITIR, Modo de Bajo Consumo, Modo Comando, Modo transparente y Modo transparente, Modo API [33].

- **Modo recibir/transmitir**

El módulo XBee se encuentra en estos modos cuando al módulo le llega algún paquete RF a través de la antena (modo Receive) o cuando se manda información en serie al buffer del pin 3 (UART Data in) que luego será transmitida (modo Transmit).

La información transmitida puede ser directa o indirecta. En el modo directo la información se envía inmediatamente a la dirección de destino. En el modo Indirecto la información es retenida durante un período de tiempo y es enviada sólo cuando la dirección de destino la solicita.

- **Modo de bajo consumo (Sleep Mode)**

El modo de sueño hace posible que el módulo RF entre en un modo de bajo consumo de energía cuando no se encuentra en uso. Esto depende de la configuración en la que se encuentra. Se debe indicar que el ahorro de energía depende enormemente del voltaje de alimentación.

- **Modo comando**

Este modo permite ingresar comandos AT al módulo XBee, para configurar, ajustar o modificar parámetros. Permite ajustar parámetros como la dirección propia o la de destino, así como su modo de operación entre otras cosas. Para poder ingresar los comandos AT es necesario utilizar el Hyperterminal de Windows, el programa X- o algún microcontrolador que maneje UART y tenga los comandos guardados en memoria o los adquiera de alguna otra forma.

- **Modo transparente**

En este modo todo lo que ingresa por el pin 3 (Data in) es guardado en el buffer de entrada y luego transmitido y todo lo que ingresa como paquete RF, es guardado en el buffer de salida y luego enviado por el pin 2 (Data out). El modo transparente viene por defecto en los módulos XBee.

- **Modo API**

Este modo es más complejo, pero permite el uso de frames con cabeceras que aseguran la entrega de los datos, al estilo TCP. Extiende el nivel en el cual la aplicación del cliente, puede interactuar con las capacidades de red del módulo.

Cuando el módulo XBee se encuentra en este modo, toda la información que entra y sale, es empaquetada en frames, que definen operaciones y eventos dentro del módulo. Así, un Frame de Transmisión de Información (información recibida por el pin 3 o DIN) incluye:

- Frame de información RF transmitida.
- Frame de comandos (equivalente a comandos AT).

Mientras que un Frame de Recepción de Información incluye:

- Frame de información RF recibida.
- Comando de respuesta.

Notificaciones de eventos como Reset, Associate, Disassociate, etc.

CAPÍTULO 4. MATERIALES, CONFIGURACIÓN Y ENTORNOS DE DESARROLLO

Este capítulo se centrará en los materiales utilizados durante el desarrollo del sistema. Aquí se explicará la elección de cada dispositivo utilizado, las herramientas de configuración y de programación.

4.1. Material utilizado

Hemos elegido los siguientes materiales: los módulos XBee para la comunicación inalámbrica entre los nodos, el Arduino como plataforma de cálculo y control de cada nodo, los micrófonos para recolectar niveles de ruido, y los LEDs para alerta. En las siguientes secciones explicaremos en detalle estos dispositivos.

4.1.1 Elección del Arduino Uno

Hemos elegido Arduino UNO teniendo en cuenta que no precisábamos de una gran cantidad de entradas y salidas, ni tampoco una gran capacidad de cálculo. Además, su bajo coste la hace idónea para el proyecto.

Las características que consideremos importantes en el momento de elegir Arduino UNO, explicamos detalladamente más abajo.

4.1.2 La plataforma Arduino

- **¿Qué es Arduino?**

“Arduino es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar. Se creó para artistas, diseñadores, aficionados y cualquiera interesado en crear entornos u objetos interactivos.” [1].

La plataforma Arduino se programa mediante el uso de un lenguaje de programación intuitivo (IDE) de Arduino [4]. Equipando Arduino con sensores, activadores, luces, altavoces, módulos complementarios (denominados shields), y otros circuitos integrados, es posible convertir la plataforma en un "cerebro" programable para casi cualquier sistema de control.

- **¿Por qué Arduino?**

- Accesible
- Multi-Plataforma
- Entorno de programación sencilla y directo
- Software ampliable y de código abierto
- Hardware ampliable y de código abierto

- **Arduino, una plataforma de código abierto**

Arduino como es hardware de código abierto, todos los archivos de diseño, esquemas y código fuente están disponibles para todo el mundo de forma gratuita [4]. Esto significa que es más fácil adaptar ARDUINO para un determinado fin y, además, que podemos integrar la plataforma ARDUINO en nuestros diseños, fabricar y vender clones Arduino y utilizar las bibliotecas de software de Arduino en otros proyectos.

Placas Arduino

Existen varias versiones de las placas Arduino. Los fabricantes están lanzando constantemente placas nuevas con diferentes características. La siguiente sección recoge algunas de las características de las placas oficiales.

- **Arduino UNO**

En primero lugar explicaremos la placa de Arduino UNO que utilizamos como plataforma de cálculo para controlar cada nodo. La UNO, véase la Figura 16) utiliza un chip conversor de USB a serie 16U2 y un ATmega 328p como microcontrolador principal [4].

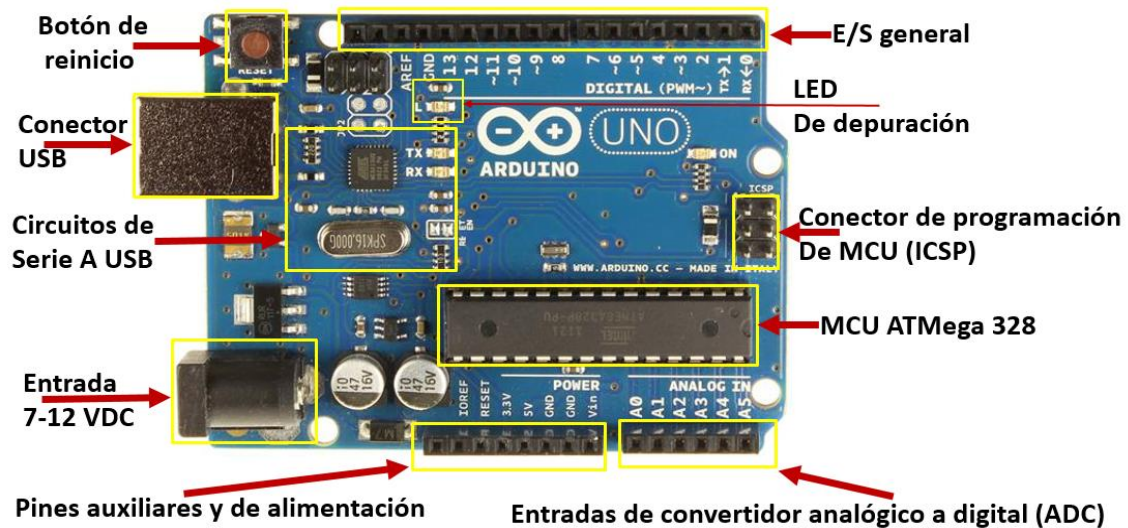


Figura 16. La placa Arduino Uno [4]

- **Características de Arduino Uno**

Según la página web oficial de Arduino [1], estas son las principales características de Arduino Uno:

- Micro controlador ATmega328
- Voltaje de funcionamiento 5V
- Voltaje de entrada (recomendado) 7-12V
- Voltaje de entrada (limite) 6-20V
- Pines E/S digitales 14 (6 proporcionan salida PWM)
- Pines de entrada analógica 6
- Intensidad máxima por pin 40 mA
- Intensidad de pin 3.3V 50 mA
- Memoria Flash 32 KB (ATmega328) de las cuales 0.5 KB las usa el gestor de arranque (boot loader)
- SRAM 2 KB (ATmega328)
- EEPROM 1 KB (ATmega328)
- Velocidad de reloj 16 MHz

El Arduino UNO puede ser alimentado vía la conexión USB o con una fuente de alimentación externa. Algunos de los pines tienen funciones especializadas:

- **Serie:** Pin 0 (RX) y pin 1 (TX). Están disponibles para recibir datos (RX) y transmitir (TX) datos a través de puerto serie TTL.
- **Interrupciones Externas:** pin 2 y pin 3. Estos pines se pueden configurar para que interrumpan la ejecución del programa al detectar un flanco o un nivel.
- **PWM:** pines 3, 5, 6, 9, 10 y 11. Proporcionan una salida PWM (modulación por ancho de pulsos) con temporizadores de 8 bits de resolución.
- **SPI:** pines 10, 11, 12 Y 13. Estos pines proporcionan comunicación SPI (Serial Peripheral Interface).
- **LED:** pin 13. Hay un LED integrado en la placa conectado al pin digital 13, cuando este pin tiene un valor HIGH (5V) el LED se enciende y cuando este tiene un valor de LOW (0) el LED se apaga.
- **6 entradas analógicas,** cada una de ellas proporciona una resolución de 10 bits (1024 valores). Por defecto se mide de tierra a 5 voltios.
- **I2C:** pin 4 (SDA) y pin 5 (SCL). Soporta del protocolo de comunicaciones I2C / TWI.
- **AREF.** Este pin está dos pines más arriba del digital pin 13, proporciona un voltaje de referencia para las entradas analógicas.
- **Reset.** Si en este pin se suministra un cero lógico, se reinicia el microcontrolador. El ATmega328 en las placas Arduino UNO viene precargado con un gestor de arranque (boot loader) que permite cargar nuevo código sin necesidad de un programador por hardware externo. La carga de un nuevo código se realiza a través del entorno de desarrollo Arduino y la conexión serie/USB.

- **Arduino Leonardo**

La placa Arduino Leonardo (véase la Figura 17) utiliza como microcontrolador principal el 32U4, que tiene una interfaz USB integrada [4]. Por tanto, no necesita una MCU secundaria para llevar a cabo la conversión de serie a USB. Esto reduce el coste nos permite hacer cosas únicas como emular un joystick o un teclado.

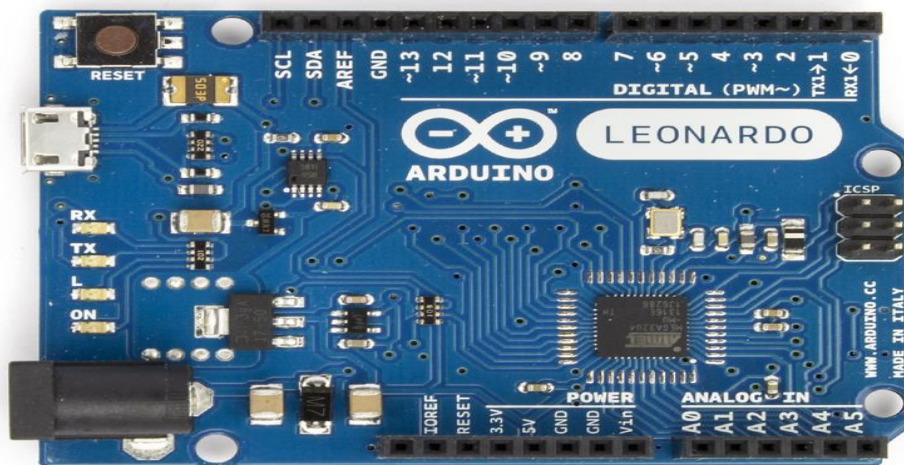


Figura 17. La Arduino Leonardo [1]

- **Arduino Mega 2560**

La placa Arduino Mega 2560 (véase la Figura 18) emplea como MCU principal un ATmega 2560, que tiene 54 E/S generales que nos permiten comunicarnos con muchos más dispositivos [4]. La Mega también tiene más canales ADC y tiene cuatro interfaces serie de hardware (a diferencia de la única interfaz serie que encontramos en la UNO).

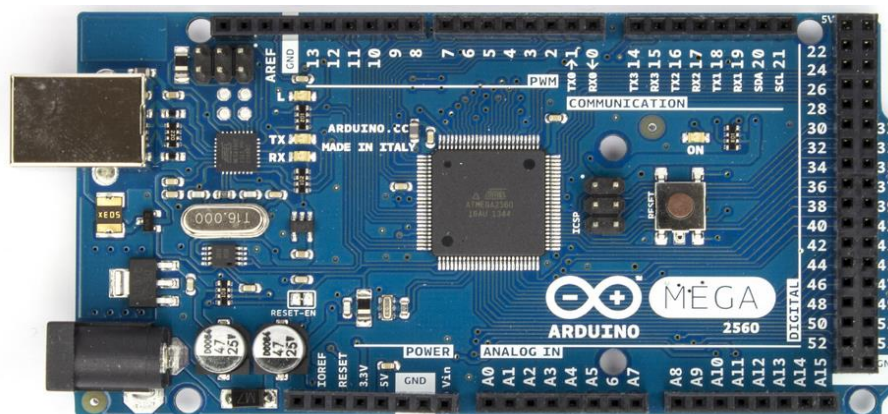


Figura 18. La Arduino Mega 2560 [1]

- **Arduino Mega ADK**

La placa Mega ADK [1], es una placa basada en el Atmega2560. Cuenta con una interfaz de host USB para conectar con los teléfonos o tablets basados en Android. Cuenta con 54 pines de entradas / salidas digitales, 16 pines de entradas analógicas, y 4 pines UARTs (hardware puertos serie).

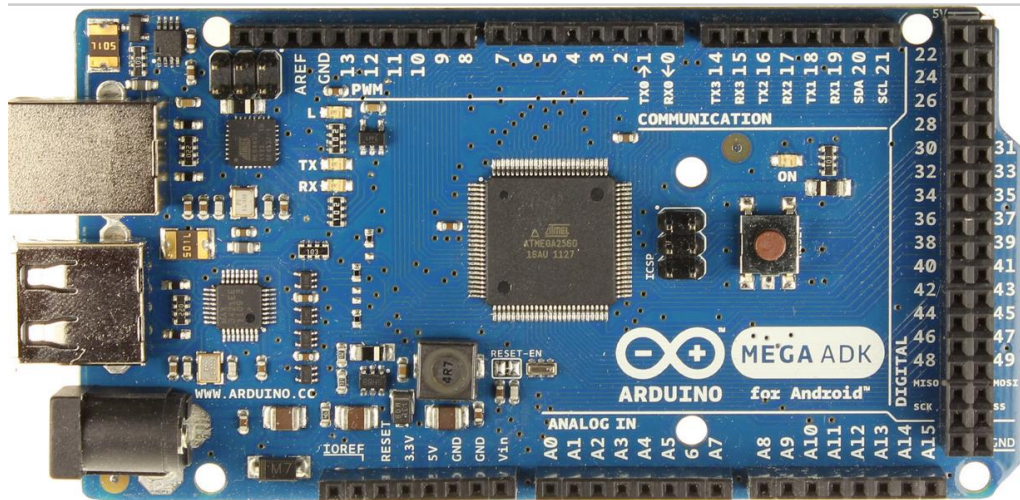


Figura 19. La Arduino Mega ADK [1]

- **Arduino Due**

A diferencia de las demás variantes de Arduino, que utilizan MCU AVR de 8 bits, la placa Arduino Due (véase la Figura 20) utiliza la MCU SAM3X ARM Cortex M3 de 32 bits. La Due ofrece ADC de mayor precisión, modulación por ancho de pulsos (PWM) de resolución elegible, convertidores de digital a analógico (DAC), un conector USB anfitrión y una frecuencia de reloj de 84 MHz.

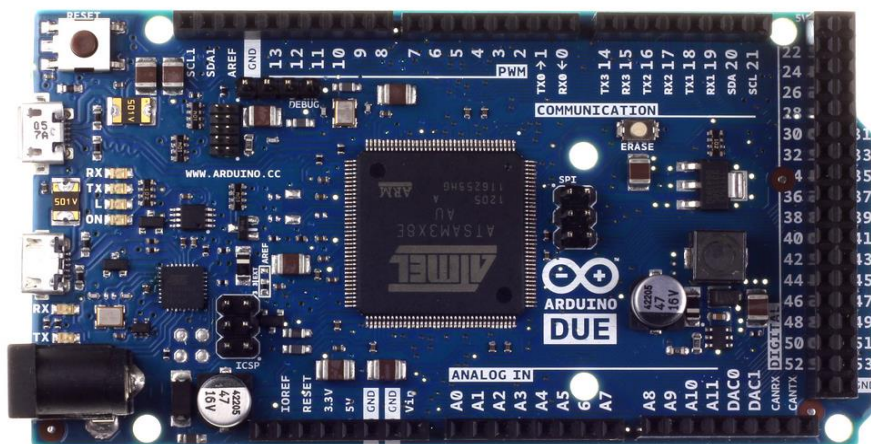


Figura 20. La Arduino DUE [1]

- **Arduino Nano**

La placa Arduino Nano (véase la Figura 21), está diseñada para montarse en el conector de una placa de pruebas. Su tamaño reducido hace que sea perfecta para su uso en proyectos más acabados [4].

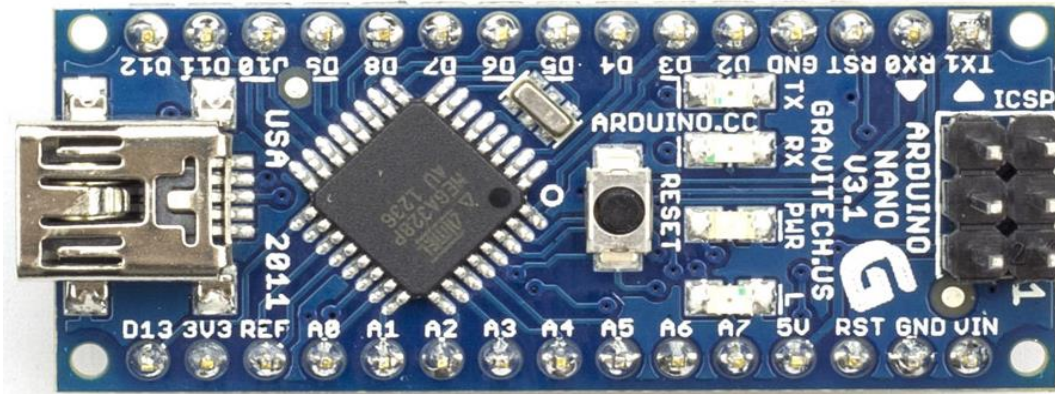


Figura 21. La Arduino Nano [4]

- **Arduino LilyPad**

La placa Arduino LilyPad (véase la Figura 22) es única porque está diseñada para coserse a la ropa. Utilizando un hilo conductor, podemos conectarla a sensores cosibles, led's y más. Para que el tamaño pueda ser reducido, tenemos que programarla utilizando un cable FTDI.

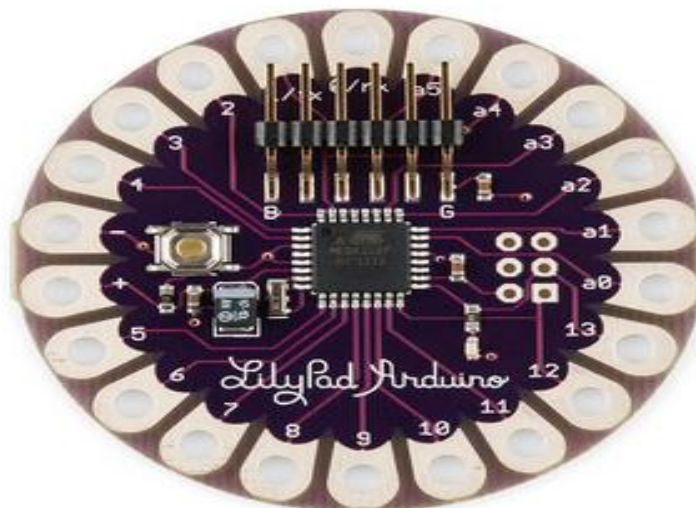


Figura 22. Arduino LilyPad

4.1.3. Elección de los módulos XBee

Hemos elegido el módulo XBee Series 1 para comunicación inalámbrica teniendo en cuenta la facilidad de conexión y programación de dicho módulo. Como no hace falta que la aplicación se comunique a una gran distancia, el módulo *XBee Series 1* (véase la Figura 23) es suficiente para nuestro sistema.



Figura 23. XBee 802.15.4 [3]

- **Módulo de conexión entre Arduino y XBee**

Para conectar la Arduino UNO y el módulo XBee hemos elegido Arduino Wireless Proto Shield, que hace de interfaz entre el módulo XBee y la placa base Arduino. Se basa en el módulo XBee de Digi, pero se puede utilizar cualquier módulo con la misma distribución de pines. La Figura 24 en la continuación muestra ejemplo del Arduino Wireless Proto Shield que hemos utilizado para el proyecto.

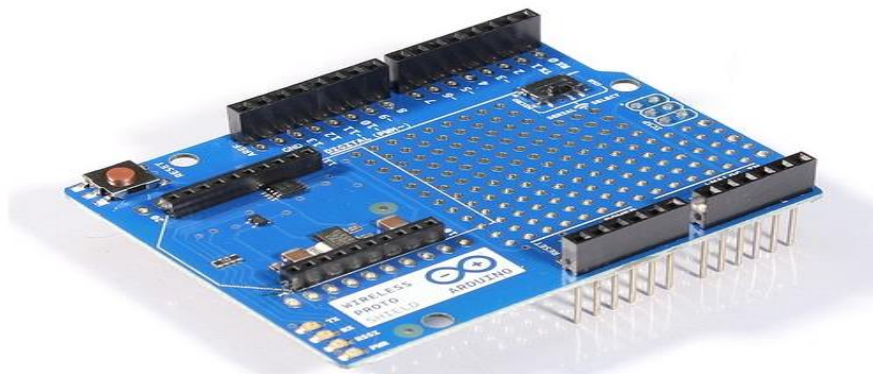


Figura 24. Arduino Wireless Proto Shield [1]

4.1.4. Elección de XBee Explorer USB

Para configurar los módulos XBee hemos elegido el dispositivo XBee Explorer USB de SparkFun, que hace de interfaz entre el módulo XBee y el PC, se realizan la configuración de manera más sencilla. La Figura 25 muestra ejemplo del dispositivo XBee Explorer USB.

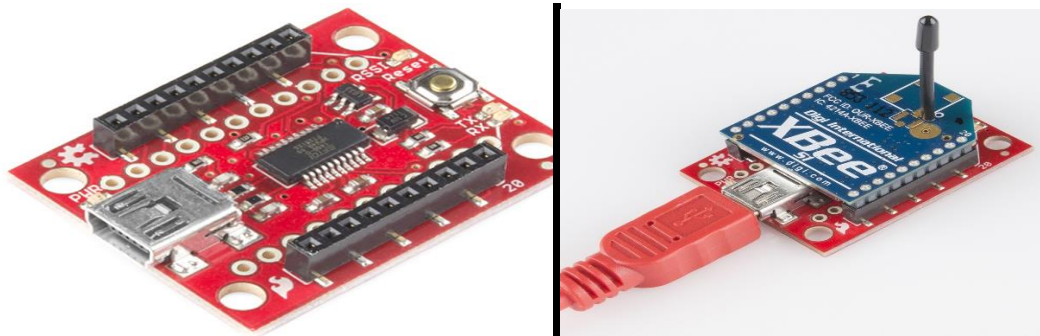


Figura 25. USB Explorer de SparkFun [5]

4.1.5. Elección del Micrófono

Para capturar el ruido en los tres nodos sensoriales Emisores necesitamos micrófonos. Hemos elegido el micrófono KY-037 (véase la Figura 26), que presenta las características que necesitamos para la realización del proyecto.

El módulo tiene dos salidas para la detección de sonido:

- **AO**, salida analógica, la señal de tensión de salida en tiempo real del micrófono.
- **DO**, cuando la intensidad del sonido alcanza cierto valor umbral, será salida de baja señal de alto nivel (valor umbral de sensibilidad se puede ajustar a través del potenciómetro).

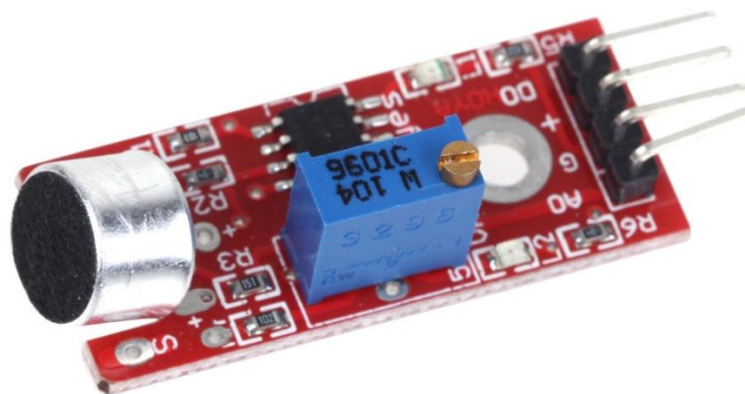


Figura 26. Micrófono KY-037

¿Cómo hacemos conexión con el Arduino?

Este micrófono (véase la Figura 26) tiene cuatro pines que necesitan ser conectados al Arduino (véase la Figura 27). El pin **AO** se debe conectar a la entrada analógica **0** en el

Arduino (**A0**). El pin **G**, se debe conectar a tierra en el Arduino (**GND**), el pin + (**VCC**) se debe conectar a power en el Arduino (+ **5V**), y por último la salida digital (**DO**) del micrófono debe ser conectada al pin digital **2** en el Arduino.

Pines Arduino	Pines Sensor Micrófono
A0	A0
GND	G
5V	+
Digital Pin 2	DO

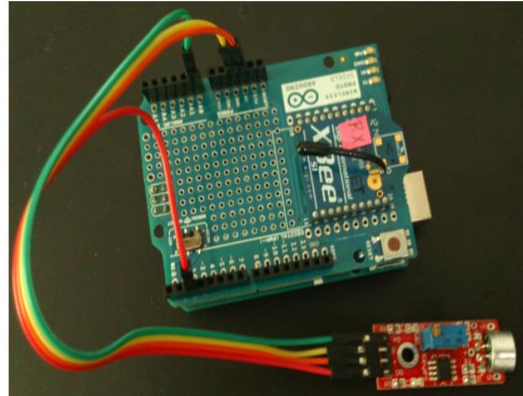


Figura 27. Cómo conectar micrófono en el Arduino

4.1.6. Elección de cargador USB portátil (Batería Power Bank)

Hemos utilizado un cargador USB portátil para alimentar los tres nodos sensoriales Emisores.

La Batería Power Bank tiene las características apropiadas para nuestro proyecto. Se trata de una batería externa para cargar todo tipo de dispositivos digitales, sólo tenemos que conectar el cable USB al dispositivo. Posee una carga de 3600mAh, una salida USB 5V/1A y una entrada micro USB 5V/1A. La Figura 28 en la continuación muestra ejemplo del cargador utilizado en nuestro proyecto.



Figura 28. Cargador USB portátil - Batería Power Bank [35]

4.2. Herramientas de programación/configuración

En esta sección se explican las herramientas de programación y de configuración usadas para la realización de este proyecto.

Antes de poder utilizar los XBees, es necesario configurarlos para que se comuniquen entre sí. Los XBees ya vienen de fábrica con la capacidad de comunicarse; están configurados en un canal predeterminado y en modo emisión. En otras palabras, envían y reciben con cualquier otro XBee configurado de la misma manera que esté a su alcance.

4.2.1. Elección de X-CTU para configurar los XBees

Hemos utilizado X-CTU que es una herramienta gráfica sencilla de utilizar para configurar los módulos XBee. Se utiliza para leer y escribir los valores de: PAN ID, DH, DL, MY y etc. tanto para el coordinador como para los dispositivos finales.

Para poder usar X-CTU usamos el XBee Explorer USB como mencionamos anteriormente, que hace de interfaz entre el módulo XBee y el PC. Insertamos un cable mini USB al PC y tendremos acceso directo a los pines TX/RX del XBee para programarlo.

Elegir la configuración para el XBEE

Existe una gran cantidad de opciones de comunicación para los XBee, aquí veremos los valores más importantes que se deben configurar:

- **PAN ID:** identificador de la red de área personal (PAN). Todos los XBee con los que el XBee quiera comunicar deberán tener asignado el mismo ID de PAN.
- **MY:** mi dirección. Es una dirección única que identifica cada XBee dentro de una red de área personal determinada.
- **DL:** dirección de destino. Es la dirección única del XBee con el que se quiere comunicar este XBee.
- **BD:** tasa de baudios. La velocidad a la que se comunicarán las radios. Utilizaremos 9.600 baudios, que es el valor predeterminado.

La Tabla 3 muestra cómo hemos configurados los nodos End Device y el nodo coordinador que recibe estos datos.

	Coordinador	END DEVICE	END DEVICE	END DEVICE
		Nodo 1024	Nodo 1025	Nodo 1026
PAN ID	3033	3033	3033	3033
DH	0	0	0	0
DL	1	1023	1023	1023
MY	1023	1024	1025	1026

Tabla 3. Configuraciones de los nodos End Device y Coordinador

Los pasos para configurar cada nodo, por ejemplo el nodo 1024 (ver Tabla 3), con X-CTU son los siguientes:

1. En el lado izquierdo de la ventana (véase Figura 29) aparece una lista de los puertos COM disponibles.

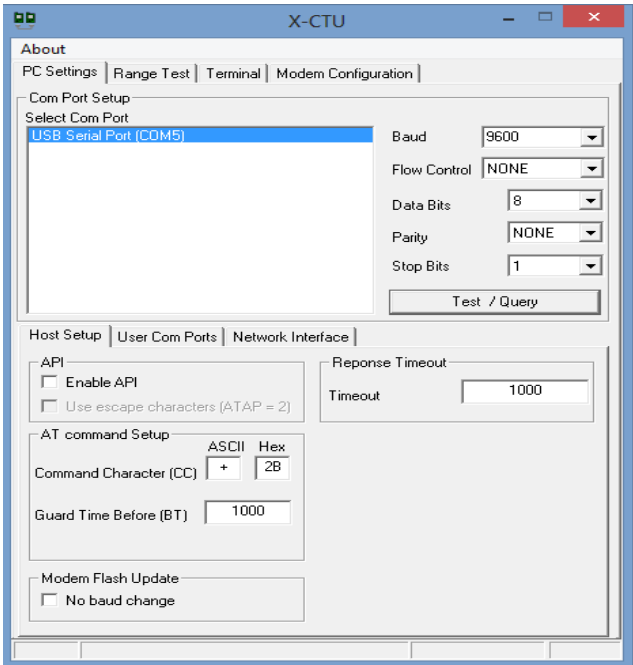


Figura 29. Ventana principal de X-CTU

2. Seleccionemos el puerto COM al que está conectado su XBee y hagamos clic en el botón **Test/Query** (Probar/Consultar), que aparece destacado en la Figura 29. Si se trata de un XBee configurado con los valores predeterminados (una

tasa de baudios de 9.600), emergerá la ventana que muestra la Figura 30, que confirma que se ha leído la información actual de la radio.

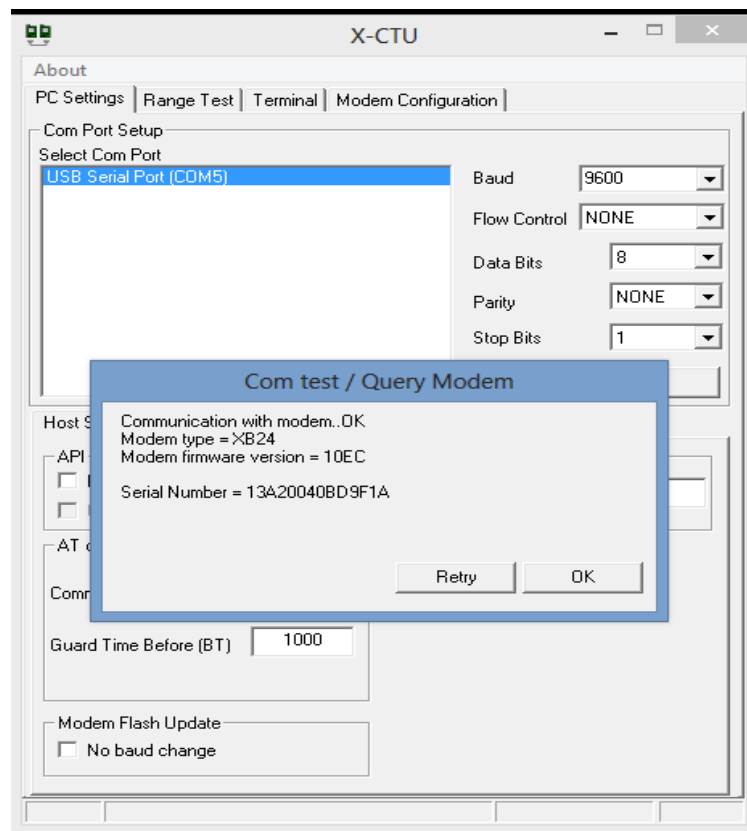


Figura 30. Confirmación de la consulta a X-CTU

3. Navegamos por la pantalla de configuración del módem y hacemos clic en el botón Read (Leer) para mostrar todas las opciones de configuración disponibles en nuestro XBee y cómo están configuradas en ese momento. Debería mostrar algo parecido a la Figura 31.

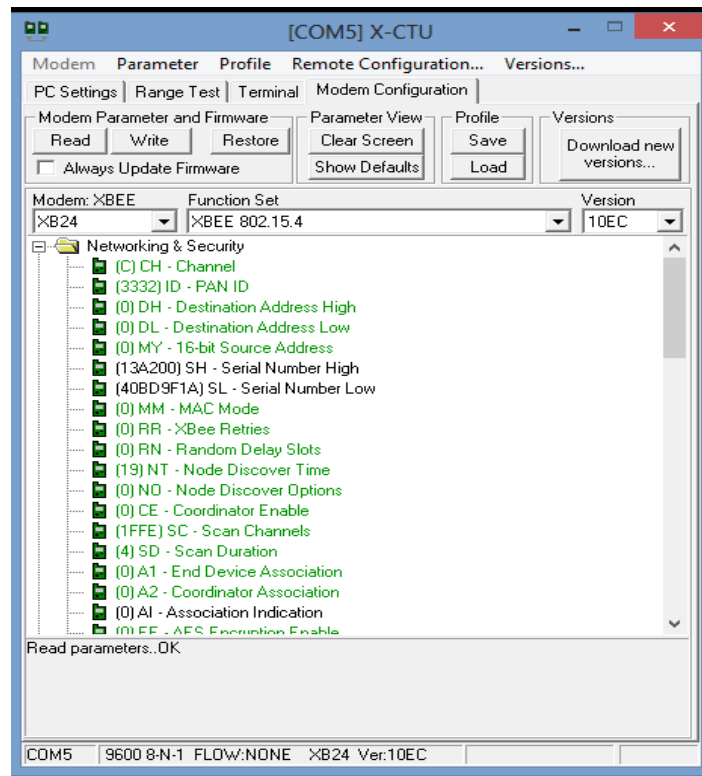


Figura 31. Configuración del módem en X-CTU

4. Ahora configuramos el ID de la PAN, la dirección de origen y la dirección de destino. Podemos configurar también otras opciones, pero vamos a centrarnos en éstas. Para cambiar una configuración, sólo tenemos que hacer clic para hacerla editable. De acuerdo a la Tabla 3, utilizamos los siguientes valores:
 - ✓ **ID 3033.**
 - ✓ **DL 1023.**
 - ✓ **MY 1024.**
5. Hacemos clic en el botón Write (Escribir) de la parte superior de la ventana para escribir estos valores en el XBee. Al hacerlo, esos valores deberían volverse azules. En la Figura 32 aparecen destacados.

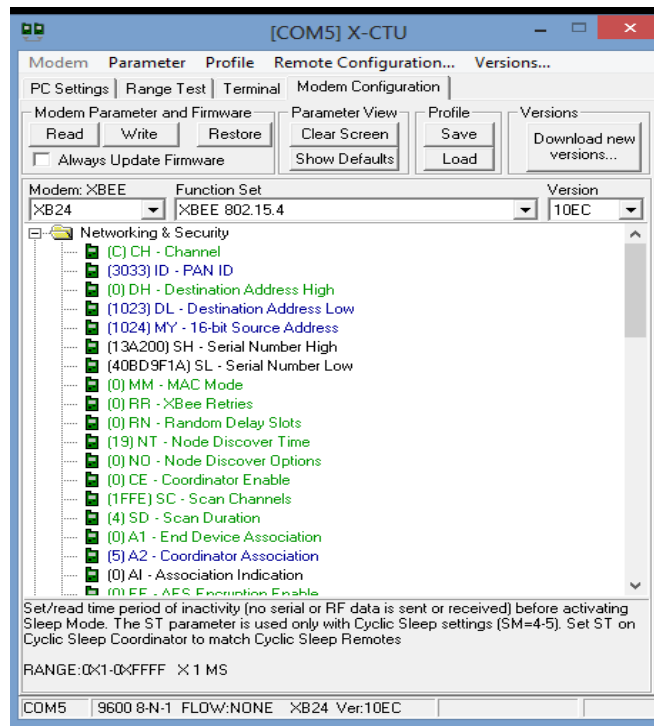


Figura 32. Configuraciones escritas en XBee

Realizaremos los mismos pasos con el resto de módulos XBee, pero cambiando los valores DL y MY para que las radios se comuniquen entre sí.

4.2.2. Elección de IDE de Arduino

Para programar el microcontrolador se ha utilizado un eficiente entorno de desarrollo integrado o IDE, que permite la conexión del ordenador con la placa para cargar los programas y comunicarse con ella. IDE de Arduino se puede descargar de forma libre desde la web de la plataforma Arduino [1], dispone gran cantidad de ejemplos y está bien documentada.

Este software se puede utilizar en sistemas operativos Windows, Mac o Linux y proporciona herramientas como editor de código, compilador, cargador y monitor serial, además de librerías y ejemplos.

El lenguaje de programación Arduino está basado en C/C++. Los programas, denominados comúnmente sketches, se dividen en tres partes principales: **estructura**, **variables** y **funciones** (véase la Figura 33). Además todo programa debe comprender dos funciones esenciales denominadas **Setup()** y **Loop()**:

- **La función Setup()**. La función Setup se llama cuando se inicia un sketch. Es un buen lugar para realizar tareas de configuración, como definir los pines o inicializar bibliotecas, etc. La función Setup sólo se ejecutará una vez, después de cada arranque o reinicio de la placa Arduino.
- **La función Loop()**. Después de crear una función Setup(), que inicializa y establece los valores iniciales, la función Loop () hace exactamente lo que su nombre indica, ejecuta un bloque de código de forma cíclica.



Figura 33. IDE Arduino-1.6.5 [1]

4.2.3. Elección de Java para desarrollo de la interfaz gráfica

Como hemos comentado en los objetivos, los datos se muestran en una interfaz gráfica en el computador conectado al coordinador. La idea es programar en Java una interfaz que permite monitorizar el nivel de ruido de tres lugares diferentes en tiempo real.

Para programar dicha interfaz gráfica, hemos elegido el IDE NetBeans, por ser uno de los entornos de desarrollo para Java más avanzado, y especialmente por facilitar considerablemente el diseño de interfaces gráficas basadas en JFreeChart. Con el potencial de las librerías JFreeChart creamos los gráficos en los que se muestran los datos en tiempo real. Concretamente hemos utilizado la versión NetBeans IDE 8.0.2 como se muestra en la Figura 34.

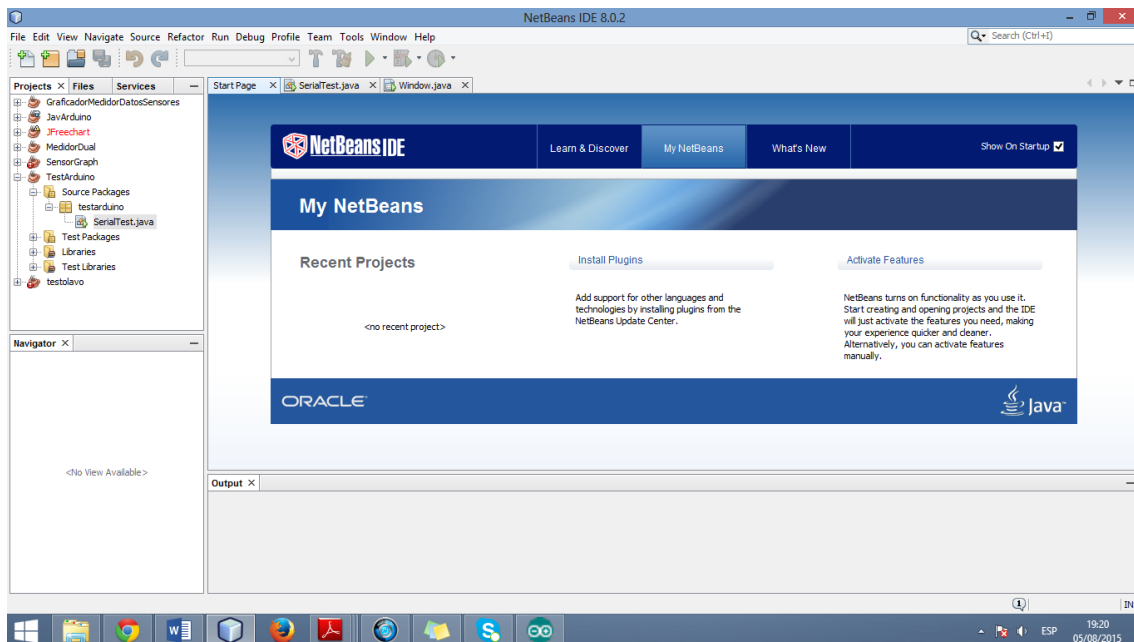


Figura 34. NetBeans IDE 8.0.2

CAPÍTULO 5. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

En este capítulo se explicará la arquitectura de este proyecto. Para ello se detallará cómo están estructurados los nodos, y se dará una breve explicación del funcionamiento de cada uno de ellos. También se incluye una breve explicación del desarrollo de la aplicación.

5.1. ¿Cómo está construido el sistema?

Según podemos ver en la Figura 35, el sistema está constituido por dos tipos de nodos (nodos **emisores** y nodo **coordinador**) y por el componente **Gestión de Datos**.

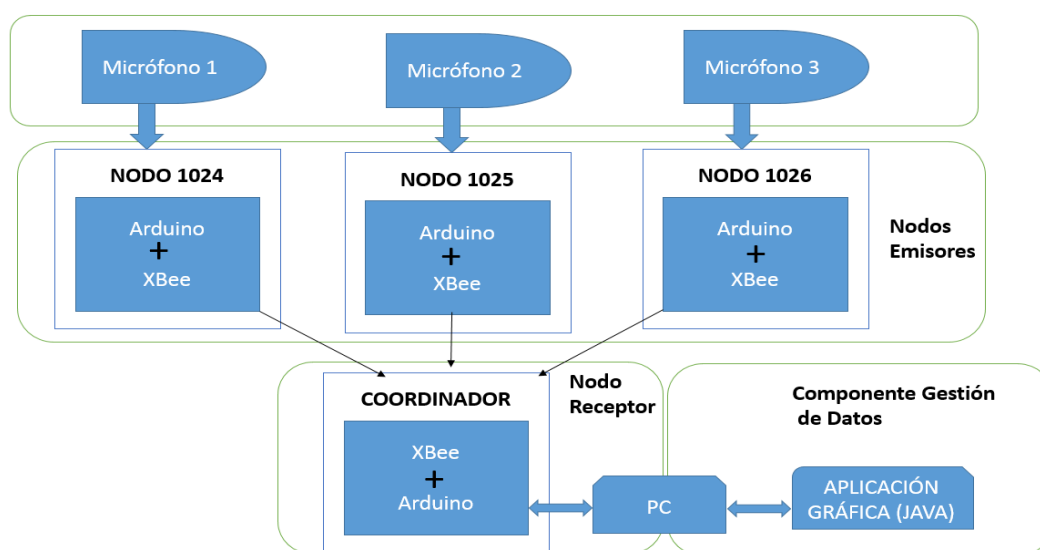


Figura 35. Arquitectura del Sistema

5.1.1. Los nodos emisores

Nodos emisores: en nuestro caso hemos utilizado 3 dispositivos finales, como se puede ver en la Figura 35. Cada uno de los nodos está formado por un micrófono, que captura

los datos, y un Arduino UNO que los reenvía al coordinador. Además cada dispositivo cuenta con un módulo de comunicación RF XBee, un LED, y una Batería Power Bank externa. A continuación, se explica con más detalle la funcionalidad de estos elementos:

- **Micrófono:** como se explicaba anteriormente, cada nodo emisor cuenta con un micrófono para recolectar niveles de ruido del mundo físico, convirtiéndolos en niveles eléctricos. Dichos niveles variarán entre 0 y 5 Voltios.
- **Arduino UNO:** cuando la plataforma Arduino recibe estos voltajes (0 a 5 voltios) de los micrófonos, lo que hace Arduino es convertirlos a formato digital, con valores que oscilan entre 0 y 1023 (10 bits), por medio de un conversor analógico-digital (ADC).
- **Comunicación por RF XBee:** Aquí cada nodo emisor cuenta con un módulo XBee, que permite enviar estos datos a través de la comunicación por Radio Frecuencia. La Tabla 3 del capítulo anterior, muestra los valores de las configuraciones que hemos utilizado para el modo transparente, donde cada módulo es programado con la dirección del destino (1023) con la que va a trabajar.
- **El LED:** Cada nodo emisor cuenta con un LED, está conectado en el pin13, y se enciende solo cuando Arduino recibe un valor analógico superior a 400, si no, permanece apagado.

5.1.2. El nodo coordinador

Nodo coordinador: cuenta con un Arduino UNO, un módulo XBee y con un cable USB A-B, como se puede ver en la Figura 35. El Arduino UNO recibe los datos por RF de los nodos emisores y los reenvía al PC por medio del USB.

En la Tabla 3 del capítulo anterior, se muestran los valores de las configuraciones que hemos utilizado para el modo transparente. En este caso, el módulo XBee es programado solo con la dirección del origen (1023), ya que es el módulo responsable de recibir los datos.

5.1.3. El componente Gestión de Datos

Componente Gestión de Datos: el PC al que va unido el dispositivo coordinador (ver en la Figura 35), se encarga de procesar y mostrar el nivel de ruido de tres lugares diferentes en tiempo real, mediante un entorno grafico que hemos diseñado con la librería JFreeChart de JAVA.

5.1.4. ¿Cómo están interconectados los nodos del sistema?

Las Figura 36 muestra las conexiones entre los nodos que forman nuestra red de sensores inalámbricos. Los nodos emisores se comunican con el coordinador inalámbricamente por medio de los módulos XBee, mientras que el nodo coordinador se comunica por USB con el PC. Los distintos sensores de cada nodo están físicamente conectados con el propio nodo de forma cableada.

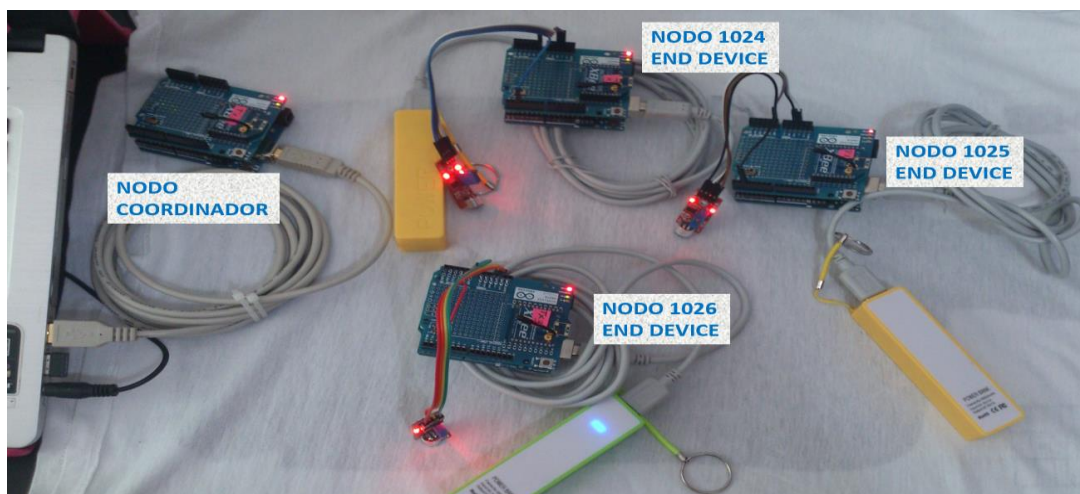


Figura 36. Los nodos emisores y el nodo coordinador

5.2. Programa desarrollado

En esta sección explicaremos los detalles de los programas desarrollados sobre la arquitectura previamente presentada.

5.2.1. Funcionalidad del sistema

Cada módulo emisor se encuentra unido al micrófono, cuya respuesta variará entre 0 y 5 Voltios. En el Arduino UNO, hay un ADC de diez bits para conversiones analógicas, de modo que la placa puede asignar un valor entre 0 y 1023 a cualquier valor analógico que proporciona el micrófono [4].

En el caso de que haya un cambio en la entrada de datos analógica en cualquiera de los sensores, el Arduino realiza una conversión analógica-digital, y le envía una serie de datos al nodo coordinador. Para ello, se utiliza la comunicación serie con el módulo XBee. Cuando el coordinador recibe los datos, se los pasa al PC por el puerto USB, para que sean mostrados gráficamente por medio de una aplicación desarrollada en java.

5.2.2. Programa desarrollado para los nodos

El PC al que va unido el dispositivo coordinador se encarga de monitorizar los datos de los nodos emisores, mediante la consola del monitor serie de Arduino.

Como podemos ver en la Figura 37, para garantizar la integridad de los datos cada nodo emisor tiene un identificador (campo **ID del Nodo**), y el valor analógico del micrófono que dicho nodo (campo **Valor**).

Como puede observarse, el **ID del Nodo** se muestra repetido dos veces, mientras que el **Valor** se muestra tres veces. Esto es debido a que el ID y el valor se envían varias veces para evitar recibir valores espurios.

En el potenciómetro de cada micrófono ajustamos la sensibilidad para que se miden los valores mínimos a un intervalo de 260 - 277, estos valores manténgase constante caso no se provoca detección acústica, caso haya provocado detección acústica el valor se aumenta. Teniendo estos valores distintos en cada nodo, se entendería mejor en nivel de ruido en los gráficos.

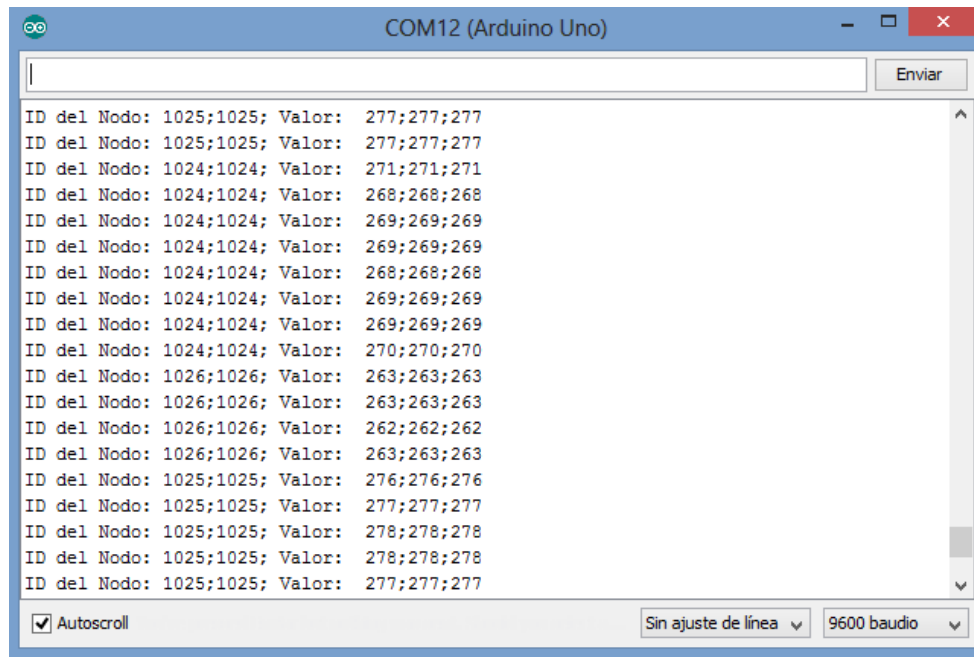


Figura 37. Impresión de los datos de los tres nodos en Monitor Serial

5.2.3. Programa desarrollada para interfaz gráfica

El computador conectado al coordinador muestra los datos en tiempo real en una interfaz gráfica. Para que podemos comunicar Arduino con Java utilizamos una librería específica en Java llamada RXTX. Esta librería nos permite recibir los datos enviados desde Arduino a través del puerto serie.

En el Figura 38 se muestra el resultado de la ejecución de la aplicación en java, que permite monitorizar los datos definitivos en tiempo real. Dicha aplicación posee las siguientes características:

- Muestra el comportamiento de los tres nodos emisores.
- En el eje **vertical** de cada gráfico se muestra el nombre de cada nodo emisor, así como el valor del ruido captado. Este nivel de ruido puede tomarse directamente del valor dado por el ADC.
- En el eje **horizontal** se representa el tiempo de muestra. Para no saturar el procesador del PC con el refresco de los gráficos, tan solo se muestra el último minuto de datos captados con los micrófonos.

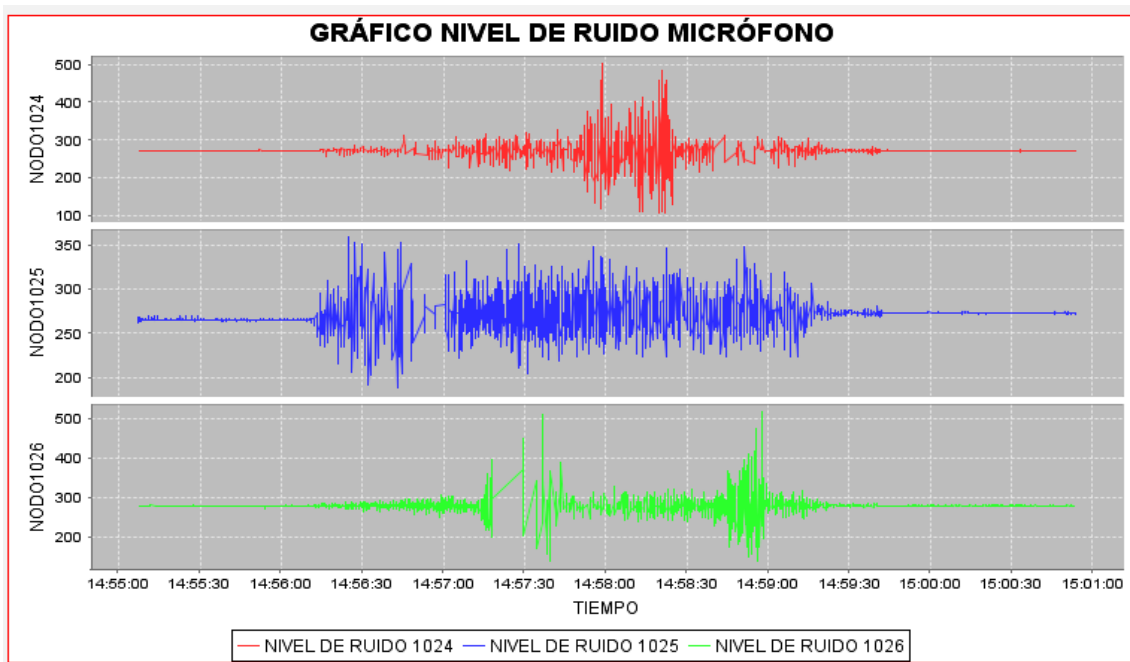


Figura 38. Interfaz Gráfica de la aplicación

Además, cada nodo guardará todos los datos recibidos en un fichero .txt, para su posterior post-proceso. En la Figura 39 aparece el fichero creado para el nodo 1024, cuyo nombre es `Nodo_1024 .txt`. El archivo cuenta con tres columnas: `Nodo`, `Valor`, `Fecha y hora`.

Gracias a estos ficheros .txt podemos analizar cuántos datos se han guardado en un segundo, lo que depende del nivel de ruido. Lo normal es que los datos se refresquen aproximadamente 10 veces por segundo en la aplicación java. Pero en el caso de que el nivel de ruido sea alto, los datos se refrescan aproximadamente 20 veces por segundo en la aplicación java.

Nodo_1024: Bloc de notas		
Archivo Edición Formato Ver Ayuda		
NODO	VALOR	FECHA Y HORA
1024	274	05:09:15:12:26:49:578
1024	274	05:09:15:12:26:49:627
1024	274	05:09:15:12:26:49:651
1024	274	05:09:15:12:26:49:676
1024	274	05:09:15:12:26:49:702
1024	274	05:09:15:12:26:50:537
1024	274	05:09:15:12:26:50:562

Figura 39. Archivo `Nodo_1024.txt` que almacena los datos monitorizados

CAPÍTULO 6. EXPERIMENTOS REALIZADOS

En este capítulo se va a hablar acerca de los experimentos que hemos hecho durante el desarrollo del proyecto. Inicialmente se comprobará hasta qué distancia hay comunicación entre emisor/receptor con los módulos XBee, y en segundo lugar se evaluará el ruido en diversos escenarios.

6.1. Comunicación emisor receptor entre los módulos XBee

Se han realizado varios experimentos para probar hasta que distancia hay comunicaciones entre emisor y receptor de los módulos XBee, comprobando si los nodos funcionan y si sus sensores recolectan datos correctamente.

6.1.1. Experimentos de distancia entre los nodos en interior de la biblioteca

El primer experimento se realizó en la biblioteca María Zambrano (ver la Figura 40).



Figura 40. Foto interior de la Biblioteca María Zambrano

Trasladamos el nodo emisor por diferentes puntos de la biblioteca comprobando su alcance y estudiamos dónde el coordinador deja de recibir correctamente los datos. En la Tabla 4 se pueden ver las diferentes distancias

a las que se ha ido comprobado el alcance de la comunicación. Comprobamos que hasta 15 metros, no hay pérdidas de paquetes en la transmisión de datos, a partir de 16 metros existe la transmisión de datos pero con pérdidas de paquetes, debido a la existencia de varios estantes de libro que se encuentran por medio. Y a 27 metros ya no hay transmisión de paquetes datos, debido a distancia y la existencia de varios estantes de libro que se encuentran por medio.

Según las especificaciones del fabricante, los módulos XBee utilizados alcanzan los 30 metros en interior. El resultado de estas pruebas no coincide, ya que a partir de los 16 metros hasta 26 metros, existe la transmisión de datos pero con pérdidas de paquetes.

Distancia entre Emisor/Coordinador	transmisión de paquetes
7 Metros	Sin pérdidas
12 Metros	Sin pérdidas
16 Metros	Con pérdidas
27 Metros	No hay transmisión de datos

Tabla 4. Alcance de la red en función de la distancia entre nodos en la biblioteca

6.1.2.Experimentos de distancia entre los nodos al aire libre

El segundo experimento que se realizó en el exterior de la biblioteca María Zambrano (ver la Figura 41).



Figura 41. Foto exterior de la Biblioteca María Zambrano

Igualmente que en el anterior experimento, separamos el nodo emisor con respecto al nodo coordinador, comprobando su alcance y donde el coordinador deja de recibir correctamente los datos. En la Tabla 5 se pueden ver las diferentes distancias a las que se ha ido comprobado el alcance de la comunicación. Comprobamos que hasta 30 metros no hay pérdidas de paquetes en la transmisión de datos, a partir de 37 metros existe la transmisión de datos pero con pérdidas de paquetes, y a 42 metros ya no hay transmisión de paquetes datos, aunque no hay existencia de obstáculos por medio. Según las especificaciones del fabricante, al aire libre la distancia que pueden alcanzar los módulos es de 100 metros. Sin embargo, como se observa en las medidas tomadas, a partir de los 37 metros se empiezan a perder paquetes.

Distancia entre Emisor/Coordinador	transmisión de paquetes
30 Metros	Sin pérdidas
37 Metros	Con pérdidas
42 Metros	No hay transmisión de datos

Tabla 5. Alcance de la red en función de la distancia entre Nodos al aire libre

6.2. Detección acústica en la biblioteca

En la Figura 42 se muestra a qué distancia estaban situados cada uno de los nodos emisores con respecto al coordinador, en el momento de la realización del experimento en la biblioteca. El nodo 1024 estaba situado a una distancia de 3 metros, el nodo 1025 situaba a una distancia de 7 metros y el nodo 1026 situaba a una distancia de 10 metros del coordinador.

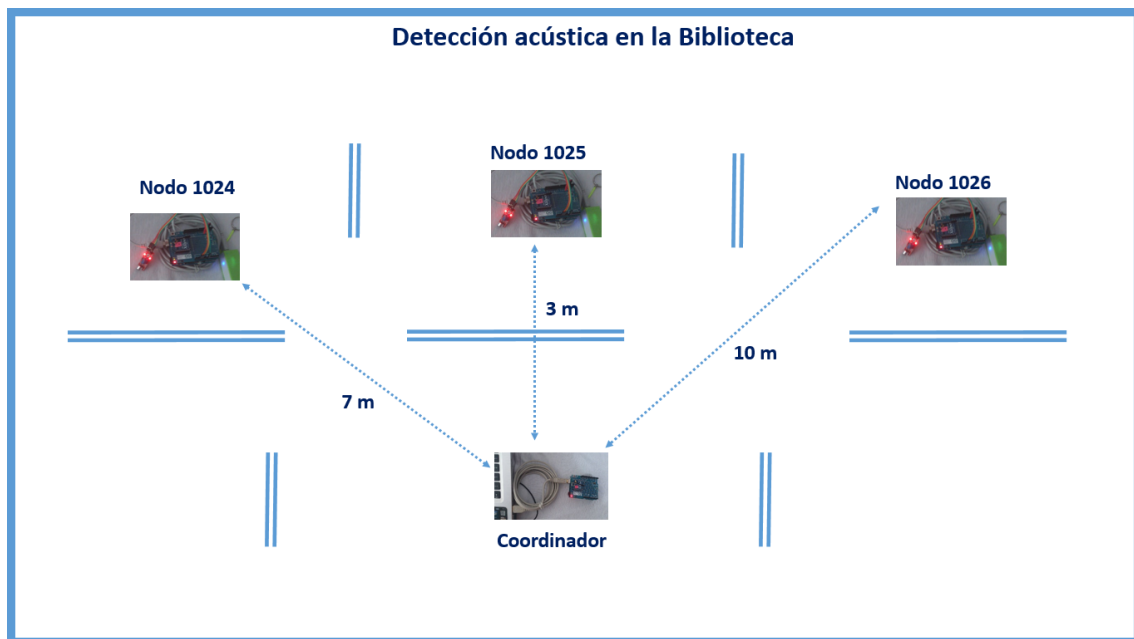


Figura 42. Mapa de localización de los nodos en la biblioteca

A continuación en la Figura 43 se representa el comportamiento del nivel de ruido recogido en la biblioteca María Zambrano. En este ambiente tranquilo comprobamos que la aplicación muestra el resultado deseado. Podemos observar que el nivel de ruido es prácticamente constante por el silencio de los estudiantes, sin embargo, el nivel de ruido aumenta siempre que los estudiantes mueven las sillas. El valor máximo que se obtiene es de 285 aproximadamente.

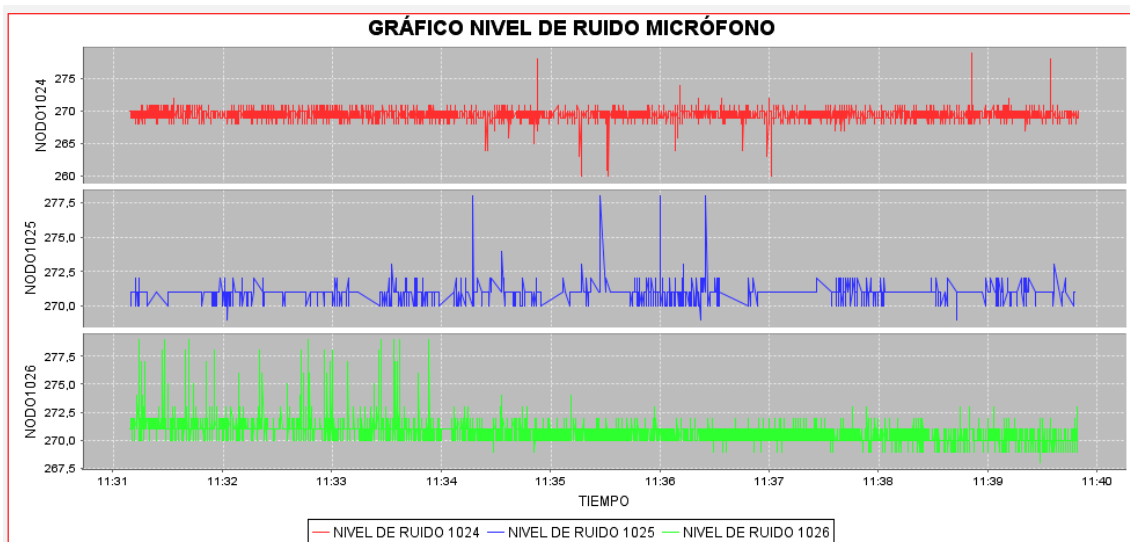


Figura 43. Detección acústica en la biblioteca

6.3. Detección acústica en una habitación con música

En la Figura 44 a continuación, muestran a que distancia estaba situado cada uno de los nodos emisores a respecto el coordinador y a respecto a los altavoces. El nodo 1024 estaba situado a una distancia de 2 metros de coordinador y a 50 centímetros del altavoz. El nodo 1025 situaba a una distancia de 80 centímetros de coordinador y a 4 centímetros del altavoz. El nodo 1026 situaba a una distancia de 3 metros de coordinador y a 196 centímetros del altavoz.

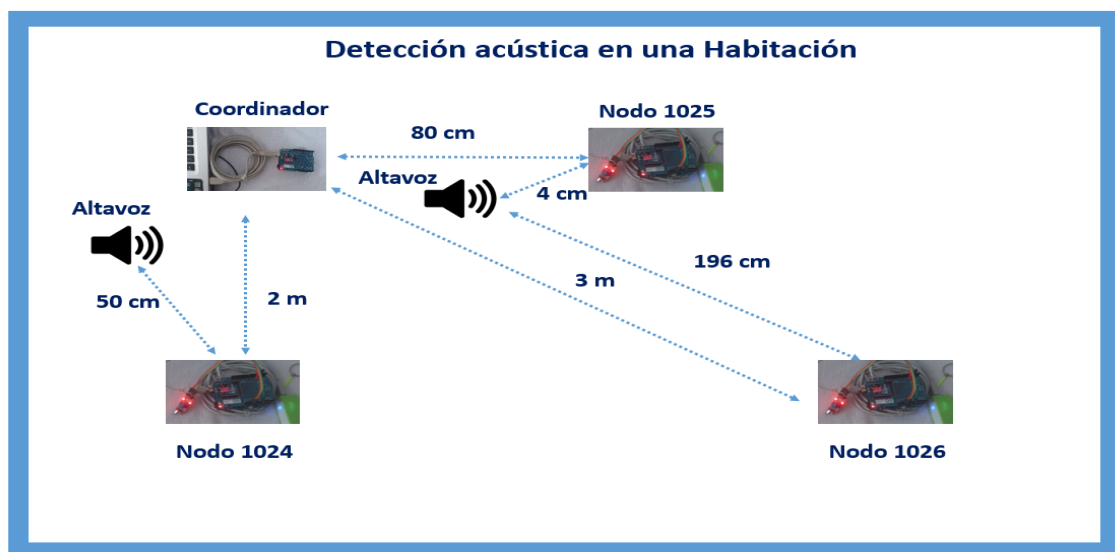


Figura 44. Mapa de localización de los nodos en una habitación

A continuación, en la Figura 45, se representa el comportamiento del nivel de ruido medido en una habitación con música. Aunque la aplicación java está preparada para mostrar el último minuto de ruido capturado, en este caso modificamos la configuración para mostrar los distintos niveles de ruido durante la reproducción de una canción entera. El nodo 1025 es el que se encuentra más cerca del altavoz, y comienza con nivel de ruido de 277, pero a partir de los 3 minutos aproximadamente, aumenta hasta un valor de 950.

El nodo 1026 es el que se encuentra más lejano del altavoz y comienza con nivel de ruido de 263, alcanzando un pico de 380 aproximadamente. El nodo 1024 es el que se encuentra a medio metro del otro altavoz, y comienza con nivel de ruido de 269, alcanzando un valor máximo de 350 aproximadamente.

Puede observarse también que al terminar la canción los tres nodos vuelven a sus niveles iniciales de ruido.

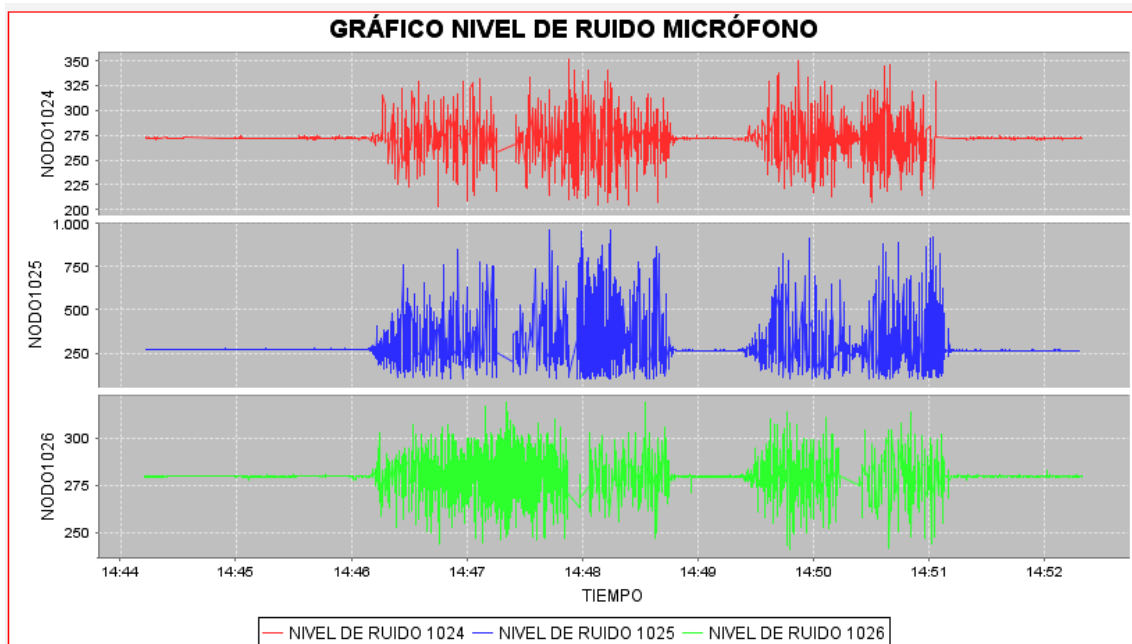


Figura 45. Detección acústica en una habitación con música

6.4. Detección acústica en la carretera de la Plaza de España

En la Figura 46 se muestra a qué distancia estaba situado cada uno de los nodos emisores con respecto al coordinador en el momento de la realización del experimento en la carretera. El nodo 1024 estaba situado a una distancia de 2 metros, el nodo 1025 situaba a una distancia de 3 metros y el nodo 1026 situaba a una distancia de 11 metros del coordinador.

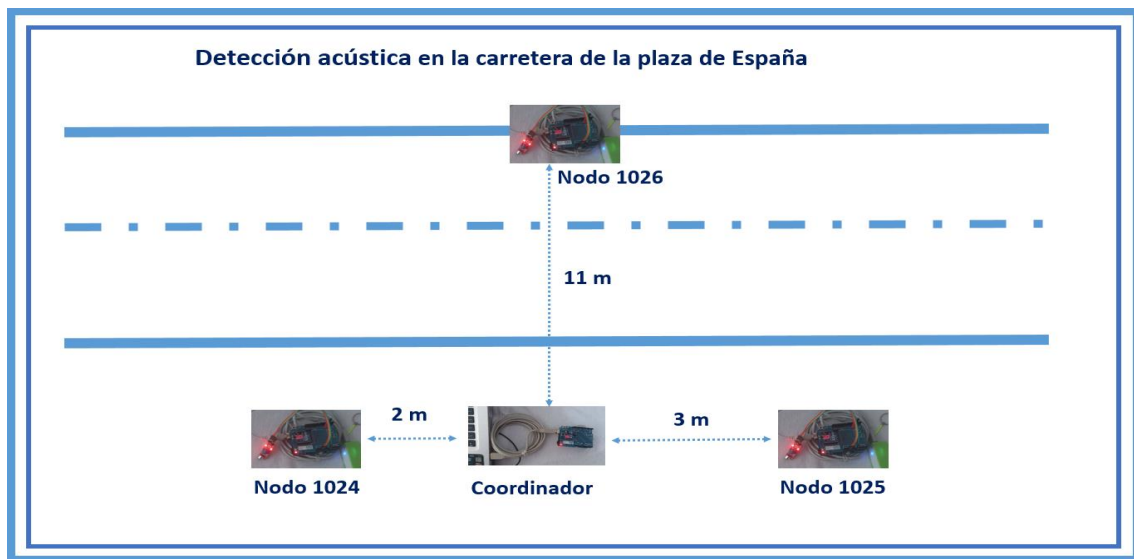


Figura 46. Mapa de localización de los nodos en la carretera

El experimento en la ciudad es más importante, con el fin de demostrar su aplicabilidad en una Smart City. El escenario elegido fue en la carretera de la Plaza de España, ya que consideramos que es un lugar que permite evaluar niveles de ruido variados (ver la Figura 47).



Figura 47. Foto en la carretera de la Plaza de España

Los nodos emisores estaban situados en distintas localizaciones cerca de la carretera donde hicimos los experimentos. A continuación en la Figura 48, se muestra el comportamiento del nivel de ruido producido por diferentes tipos de vehículos en la carretera de la Plaza de España. Podemos observar que el nivel de ruido es prácticamente igual para los dos primeros nodos, sin embargo, el nivel de ruido aumenta siempre que circulan más coches en la carretera. El valor máximo que se obtiene es de 420.

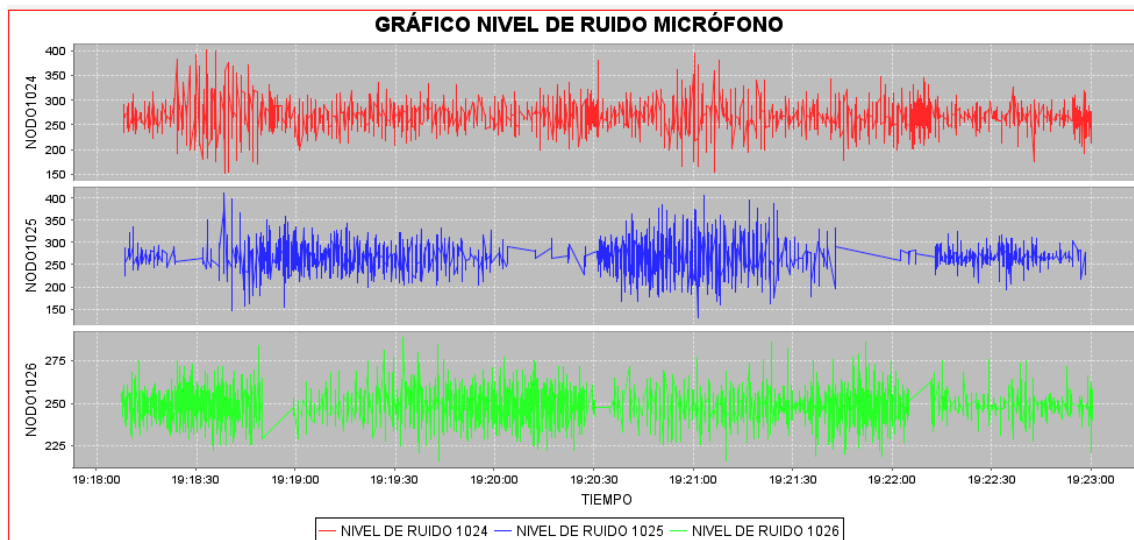


Figura 48. Detección acústica en el túnel de la Plaza de España

Como puede observarse, en los nodos 1024 y 1025 el nivel de ruido obtenido es mayor que en la biblioteca, y que en la habitación (excepto en el caso del nodo que estaba justo al lado del altavoz). El nodo 1026 envía niveles de ruido menores.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se ha implementado una red de sensores inalámbricos capaz de capturar el nivel de ruido en tres lugares distintos en tiempo real. Para ello se ha propuesto una solución, basada en hardware libre, con dos tipos de nodos: emisor y coordinador. Los nodos emisores capturan el ruido y envían los datos al coordinador, quien se comunica con el PC, donde puede observarse gráficamente la evolución del ruido.

Pese a que el sistema se ha desarrollado para 3 nodos emisores, por las limitaciones económicas, se puede escalar a más nodos.

Se han realizado varios experimentos en diversos escenarios, y se ha medido el ruido satisfactoriamente, por lo que podemos concluir que la solución propuesta podría incorporarse a una Smart City. El sistema puede utilizarse de forma sencilla para su funcionamiento en diferentes campos de las Smart Cities como por ejemplo:

- Monitorizar el ruido ambiental
- Detectar vehículos en caso de emergencia
- Monitorizar la densidad de tráfico
- Monitorizar la seguridad en interior del edificio, y etc.

En referencia a los estudios que hicimos sobre los estados de arte en Smart Cities y de las redes de sensores inalámbricos, además de los materiales utilizados concluimos que:

- En la actualidad, se han desarrollado numerosos proyectos para las Smart Cities que están orientados a solucionar problemas reales de las ciudades, mejorando así la calidad de vida de los ciudadanos.
- Las redes de sensores inalámbricos presentan fascinantes retos para la aplicación del procesamiento de la señal distribuida y el control distribuido. Permiten nuevas oportunidades tecnológicas (procesamiento barato).
- Los módulos XBee tienen múltiples usos, por ser de bajo consumo, bajo coste, además de la posibilidad de interconexión de muchos nodos en una red.
- La elección de Arduino como plataforma de cálculo se ha hecho teniendo en cuenta su bajo coste y consumo fundamentalmente. Además, la necesidad de

cómputo de nuestro sistema es baja, por lo que Arduino se adapta perfectamente.

Como trabajo futuro se proponen una serie de mejoras para la aplicación:

- Como el proyecto es para una Smart City, tendremos que posibilitar la interconexión de más nodos, utilizando varios nodos coordinadores en una red con topología de árbol.
- Añadiremos otros tipos de sensores en la red (luminosidad, humedad, etc.) que serán importante para una Smart City.
- Mejoraremos la aplicación gráfica permitiendo la posibilidad de que el usuario interactúe más con ella.

CHAPTER 7. CONCLUSIONS

In this work a wireless sensor networks able to get the noise level in three different places in real time has been implemented. For this purpose, a free hardware based solution has been proposed, utilizing two types of nodes: sensor and coordinator. The sensor nodes capture the noise with a microphone and send the data to the coordinator, which forward them to the PC. Finally, the PC will be responsible for showing the captured data thanks to a graphical application that has been developed too.

In spite of the fact that the system has been developed for just 3 nodes, because of economic reasons, it can be easily scaled for more nodes.

Several experiments in a variety of scenarios have been performed, and the different noise levels have been satisfactorily measured. Hence, it can be concluded that the proposed solution may be integrated within a Smart City. The system can be easily used in Smart Cities, for instance:

- For monitoring the environmental noise.
- To detect vehicles in an emergency case.
- To monitor the traffic density.
- To monitor the security inside a building.

Regarding the study about the Smart Cities and WSNs state of the art, we have concluded that:

- Nowadays, several projects have been developed for Smart Cities, oriented to solve real problems and helping people improve their quality of life.
- WSNs are quite challenging for implementing new types of distributed signal processing algorithms. Besides they allow integrating new technologies, because of their low cost.
- The XBee modules possess multiple applications, as they are low-power, low-cost and can be interconnected to many nodes within a network.
- The Arduino board has been selected mainly because of its low cost and low-power consumption. Moreover, as the computing requirements of our system are not high, the Arduino performance is enough for us.

8. ABREVIATURAS

WSN	Wireless Sensor Network
PWM	Pulse-Width Modulation
SDA	Serial Data Line
SCL	Serial Clock Line
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
USB	Universal Serial Bus
Hobnet	Holistic Platform Design for Smart Buildings of the Future InterNET
UE	Unión Europea
Db	decibelio
SOSUS	Sound Surveillance System
GPS	Global Positioning System
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
ITS	Intelligent Transport System
RF	Radio Frequency
ADC	Analog Digital Converter
API	Application Programming Interface
IDE	Integrated Development Environment
UCM	Universidad Complutense de Madrid
TIC	Tecnología de Información y de la Comunicación
IOT	Internet of Things

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Página oficial de Arduino <<http://Arduino.cc/>>, [Accedido en 04-06-2015].
- [2] Página oficial de ZigBee <<http://www.zigbee.org/>>, [Accedido en 05-06-2015].
- [3] Página oficial de DIGI <<http://www.digi.com/>>, [Accedido en 04-06-2015].
- [4] Jeremy Blum, "Arduino a Fondo, Aprender a Crear Fácilmente Gadgets, Giltmos, Robots y Muchos Más", Published by Wiley, 2014, ISBN: 978-84-415-3652-4.
- [5] Página oficial de SparkFun <<https://www.sparkfun.com/>>, [Accedido en 05-05-2015].
- [6] Waltenegus Dargie, Christian Poellabauer, "Fundamentals of wireless sensor networks: theory and practice", Published by John Wiley & Sons Ltd, 2010, ISBN: 978-0-470-99765-9.
- [7] Al-Sakib Khan Pathan, Choong Seon Hong, Y Hyung-Woo Lee. "Smartening the Environment using Wireless Sensor Networks in a Developing Country", Proceedings on International Conference on Advanced Communications Technology (ICACT), 2006, PAGES 705-709.
- [8] Robert Faludi, "Building Wireless Sensor Networks", Published by O'Reilly Media, 2011, ISBN: 978-0-596-80773-3.
- [9] Bruneo, Puliafito, y Scarpa, "Energy control in dependable wireless sensor networks: a modelling perspective", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, December 2011, vol. 225, no. 4 424-434.
- [10] Hitachi's Vision for Smart Cities, 2013, published by Hitachi, Ltd. <<http://www.hitachi.com/products/smartcity/download/pdf/whitepaper.pdf>>.
- [11] <http://XBEE.cl/>, [Accedido en 18-07-2015].
- [12] Página oficial de European Smart Cities <<http://www.smart-cities.eu/>>, [Accedido en 03-04-2015].
- [13] Fundación Telefónica, 2011, Smart Cities: "Un primer paso hacia la Internet de las cosas".

[14] AMETIC, 2012, Smart Cities:

<http://www.ametic.es/download/documents/Informe_Smart_Cities.pdf>, [Accedido en 09-03-2015].

[15] OECD, 2009, “Smart Sensor Networks: Technologies and Applications for Green Growth”, Proceedings on Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD), <2009 <http://www.oecd.org/sti/44379113.pdf>>, [Accedido en 09-04-2015].

[16] IERC, 2012, “The Internet of Things 2012 New Horizons”, Proceedings on Internet of Things European Research Cluster (IERC), 3rd edition, ISBN: 978 - 0 - 9553707 - 9 – 3.

[17] Página oficial de Libelium <http://www.libelium.com/>, [Accedido en 04-06-2015].

[18] Department for Business, Innovation & Skills “Smart Cities background paper” Published by Crown copyright, 2013, London, Ref: BIS/13//1209.

[19] Michael Batty, Kay Axhausen, Giannotti Fosca, Alexei Pozdnoukhov Armando Bazzani, Monica Wachowicz, Georgios Ouzounis, and Yuval Portugali, October 5, 2012 “Smart Cities of the Future”, Published by the European Union’s Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013), under grant agreement, no.284709, Paper 188.

[20] Ruthbea Yesner Clarke, October 2013, “Smart Cities and the Internet of Everything: The Foundation for Delivering Next-Generation Citizen Services”, Proceedings on International Data Corporation (IDC), Sponsored by: Cisco.

[21] Peter Corke, Fellow IEEE, Tim Wark, Raja Jurdak, Wen Hu, Philip Valencia, and Darren Moore, “Environmental Wireless Sensor Networks” Proceedings of the IEEE , Vol. 98, No. 11, November 2010.

[22] Valery Butenko, Anatoly Nazarenko, Viliam Sarian, Nikolay Sushchenko and Aleksandr Lutokhin. “Applications of Wireless Sensor Networks in Next Generation Networks”. Proceedings of International Telecommunication Union (ITU), 28 February 2014.

[23] Página Oficial de European Commission – Environment:

<http://ec.europa.eu/environment/index_en.htm> [Accedido en 09-07-2015].

[24] Proyecto EAR-IT (Experimenting Acoustics in Real environments using Innovative Test-beds) <<http://www.ear-it.eu/>>, [Accedido en 09-07-2015].

[25] Pham and Cousin, “Benchmarking low-resource device test-beds for real-time acoustic data”, International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks & Communities (TRIDENTCOM), May 5, 2014.

[26] Sébastien Sonko, 2013, “Privacy Risk Area Assessment Tool for Audio Monitoring – from legal complexity to practical applications”, Proceedings on 8th International Conference on Legal, Security and Privacy Issues in IT (LSPI).

[27] World Health Organization - Noise, Online: <<http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise>>, [Accedido en 11-07-2015].

[28] IEC, 2014 “Internet of Things: Wireless Sensor Networks” Proceedings on International Electrotechnical Commission (IEC), ISBN 978-2-8322-1834-1.

[29] Manpreet y Malhotra, “Simulation Analysis of Tree and Mesh Topologies in ZigBee Network”, Proceedings on International Journal of Grid Distribution Computing Vol.8, No.1 (2015), pp.81-92.

[30] Werner-Allen, Lorincz, Welsh, Marcillo, Johnson, Ruiz, Lees. 2006. “Deploying a Wireless Sensor Network on an Active Volcano”. Published by the IEEE Computer Society.

[31] Jang, Suk Kim and Cho, “Smart Roadside System for Driver Assistance and Safety Warnings: Framework and Applications”, Sensors 2011 is published by Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), PAGES 7420-7436. ISSN 1424-8220.

[32] WHO 2009, “Night Noise Guidelines for Europe”, Proceedings on the World Health Organization (WHO) ISBN 978 92 890 4173 7.

[33] Página oficial de Olimex, <www.olimex.cl> MCI Ltda. 2010. [Accedido en 11-07-2015].

[34] Óscar Artero, “Arduino: curso práctico de formación”, Published by RC Libros, 2013, ISBN: 9788494072505.

[35] Página oficial de Power Bank, <<https://power-bank.es/>> [Accedido en 22-07-2015].

[36] Chaudhari, Dharavath. "Study of Smart Sensors and their Applications". Proceedings on International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering (IJARCCE), Vol. 3, Issue 1, January 2014, ISSN (Online): 2278-1021.

10. ANEXO: PRESUPUESTO

En la continuación se muestra el presupuesto, de los costes relativos a los materiales utilizados para realización del proyecto.

Descripción	Especificación	Unidades	Coste unitario	Coste total
ARDUINO	UNO, A000066, ATMEGA328	4	23 €	92,00 €
MÓDULOS XBEE	DIGI INTERNATIONAL XB24-AWI-001 MÓDULO RF, TXRX, XBEE, WIRE ANT	4	21,50 €	86,00 €
Placa expansión	ARDUINO A000064 PROTOTYPE BOARD, WIRELESS, XBEE	4	17,36 €	69,44 €
XBee Explorer USB	ERF-0007, SparkFun	1	22,90 €	22,90 €
MICRÓFONOS	KY-037, módulo del sensor de detección de sonido de alta calidad	3	3,99 €	11,97 €
CABLES USB	A-B	4	5,99 €	23,96 €
Cargador USB portátil	Batería Power Bank	3	5 €	15,00 €
			TOTAL	321,27 €